

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**  
**Энциклопедия WiMAX**  
**Путь к 4G**  
**Москва:**  
**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

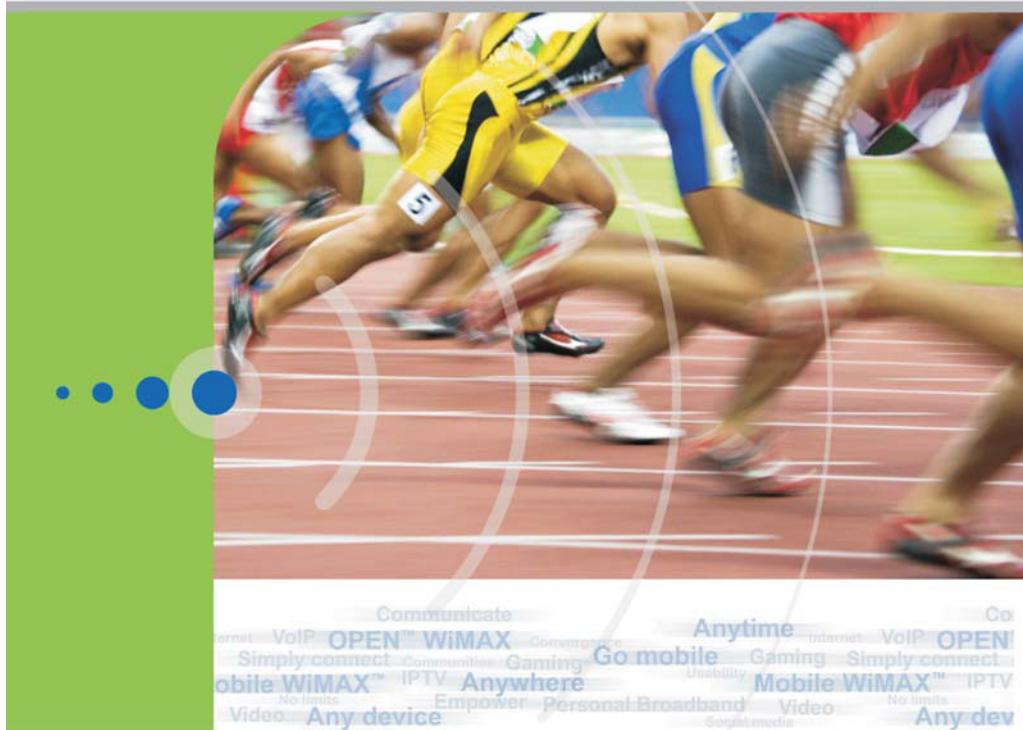
Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий.  
Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.  
© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

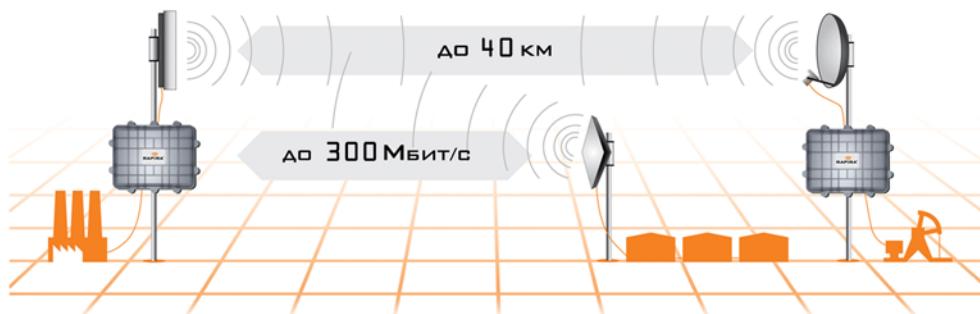


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



тел: (495) 721-8493 факс: (499) 144-4409

[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru) [info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 .....** ..... 282

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал .....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем .....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS .....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....** ..... 353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX .....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,

мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.



Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

Для получения полной версии книги в электронном виде пройдите по ссылке:

[www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=601385](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=601385)

Сайт издательства

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)



РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
**ТЕХНОСФЕРА**

## Оптовая продажа книг

Телефон: +7(495) 234-01-10 (доб. 335)

Факс: +7(495) 956-33-46

e-mail: [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)

---

## Книга-почтой

Почтовый адрес:

125319, г. Москва, а/я 91

Факс: +7(495) 956-33-46

e-mail: [pochta@technosphera.ru](mailto:pochta@technosphera.ru)

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)

*Указанные в каталоге цены*

*не включают в себя стоимость*

*почтовой доставки по России.*



ТЕХНОСФЕРА

Рекламно-издательский центр

# **Книги издательства ЗАО «РИЦ «Техносфера» вы можете приобрести в магазинах:**

## **г. Москва:**

- ▶ Сеть магазинов «Буква»
- ▶ Библио-Глобус
- ▶ Московский Дом Книги
- ▶ Пресбург на Ладожской
- ▶ ДК на Соколе
- ▶ ДК Новый
- ▶ ДК Студент
- ▶ Дом Медицинской Книги
- ▶ Молодая Гвардия
- ▶ Фолиант
- ▶ СК Олимпийский (1-й этаж, место № 6)

## **г. Санкт-Петербург:**

- ▶ Санкт-Петербургский Дом книги (Дом Зингера)

## **г. Екатеринбург:**

- ▶ Екатеринбургский Дом Книги
- ▶ 100 000 книг на Декабристов

## **г. Архангельск:**

- ▶ АВФ- книга

## **г. Новосибирск**

- ▶ Сеть магазинов «Аристотель»

## **г. Сыктывкар**

- ▶ Бук-Трейд

## **г. Ростов-на-Дону**

- ▶ Деловая литература
- ▶ Сеть магазинов «Магистр»

## **г. Томск**

- ▶ Академкнига

## **г. Омск**

- ▶ Техническая книга

## **г. Уфа**

- ▶ Мир книги

## **г. Челябинск**

- ▶ ЧелябинскКнига

## **г. Волгоград**

- ▶ Либрис

## **г. Воронеж**

- ▶ Регион-книга

## **Киоски при университетах:**

- РХТУ им. Менделеева
- МГУ, химфак
- МИСИС
- МИЭТ
- МИРА
- МИФИ

## **Ближнее зарубежье:**

## **Белоруссия**

## **г. Минск**

- ▶ ИП Юззвук НН (тел. 375-17-294-54-65)
- ▶ Техническая книга (тел. 375-17-293-39-75)

## **Украина**

## **г. Харьков**

- ▶ ЧП Кудь (тел. 057-7-54-91-16)

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

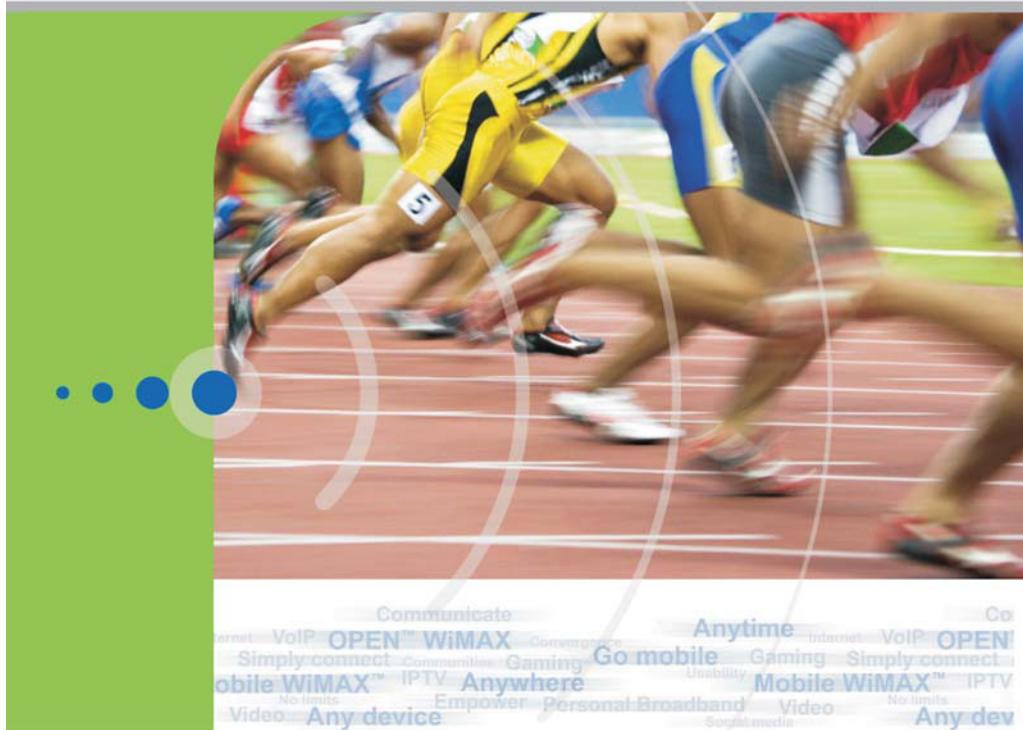
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

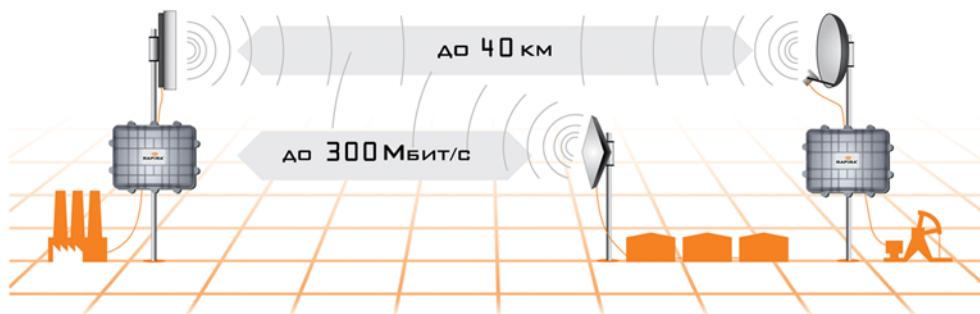


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



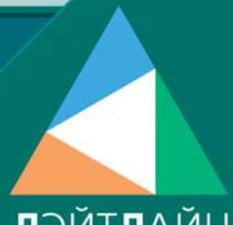
Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409

[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)    [info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал.....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

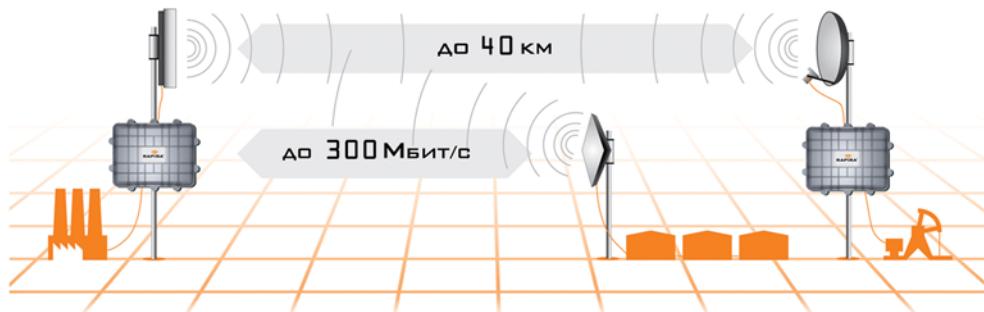


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившейся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

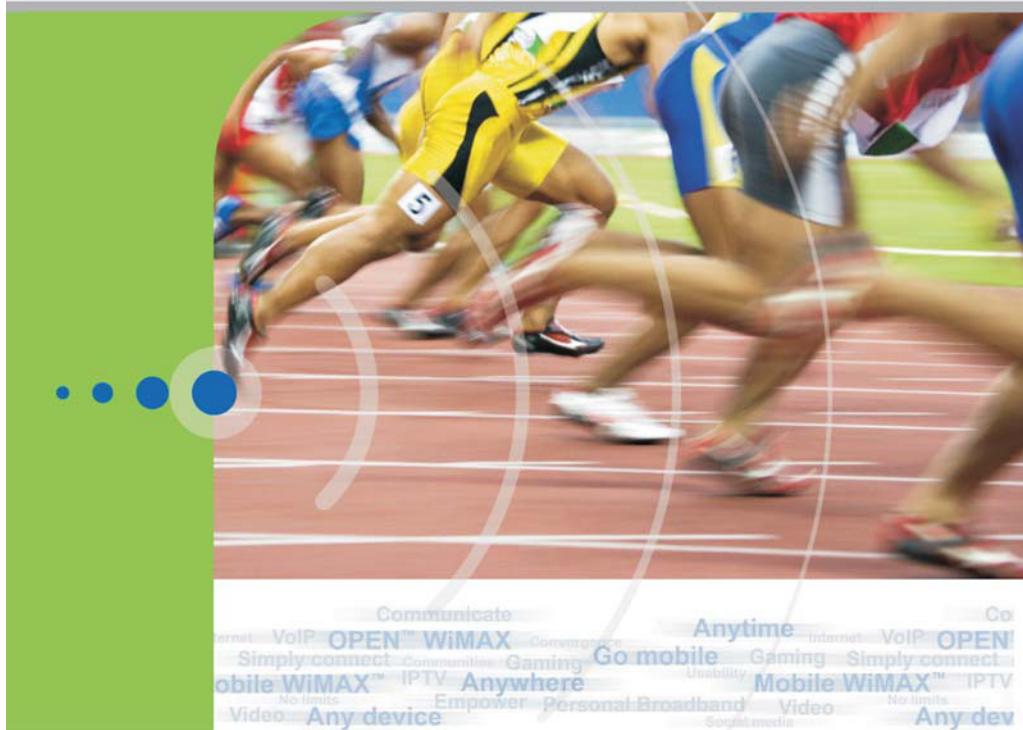
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

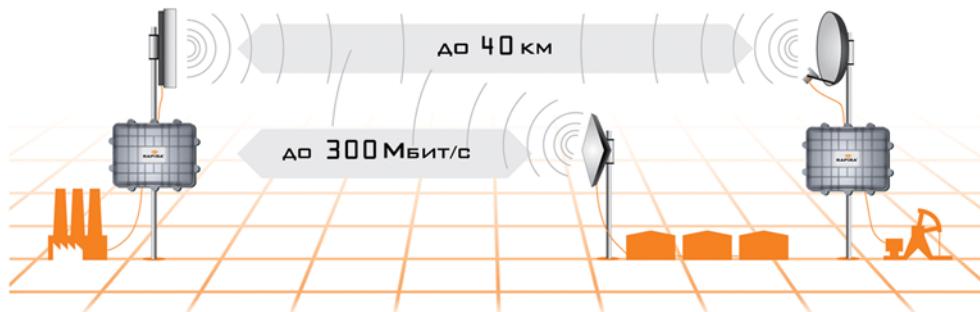


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

г. Москва, ул. Пржевальского д. 2

тел. + 7- 495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,

мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.



Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



Communicate  
Internet, VoIP, OPEN™ WiMAX, Convergence  
Simply connect, Communities, Gaming  
mobile WiMAX™, IPTV, Anywhere  
No limits, Empower, Personal Broadband  
Video, Any device

Anytime  
Internet, VoIP, OPEN™ WiMAX, Co  
Gaming, Simply connect, Mobile WiMAX™, IPTV  
Usability, Video, Social media  
Any dev

## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

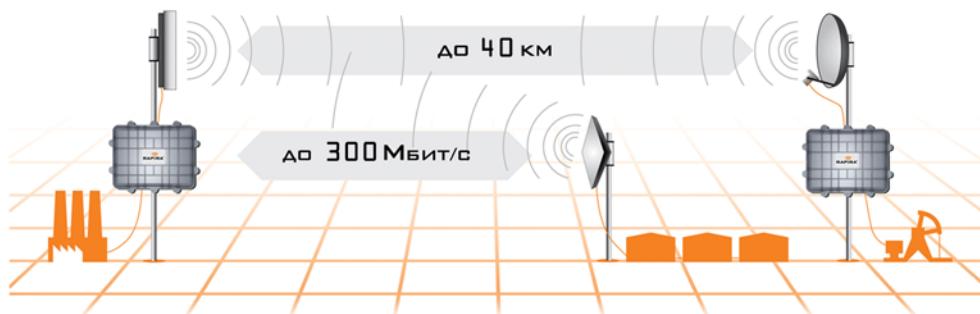


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д.2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 .....** ..... 282

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал .....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем .....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS .....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....** ..... 353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX .....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числится 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» («Information Flow in Large Communication Nets», 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» («On Distributed Communications»). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

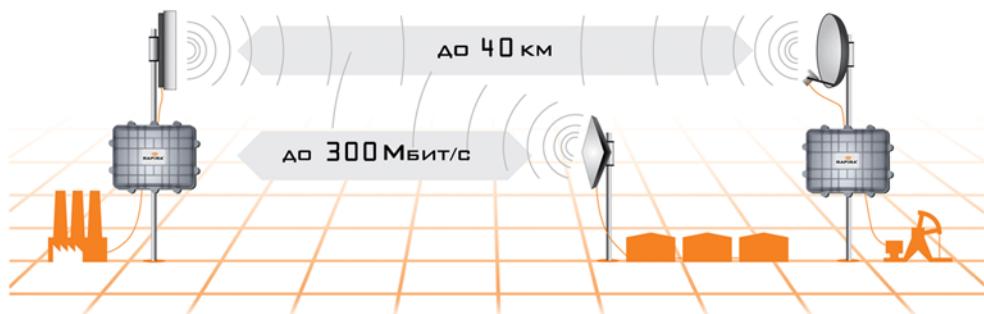


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ



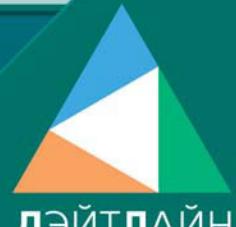
Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛайн**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Масовая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

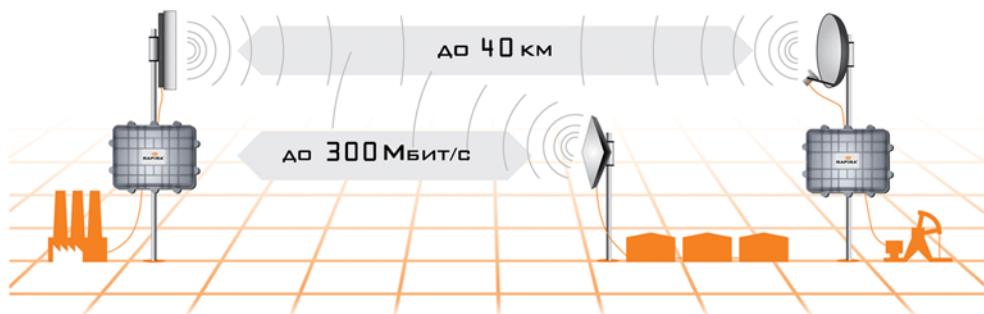


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д.2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 .....** ..... 282

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал .....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем .....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS .....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....** ..... 353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX .....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Масовая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

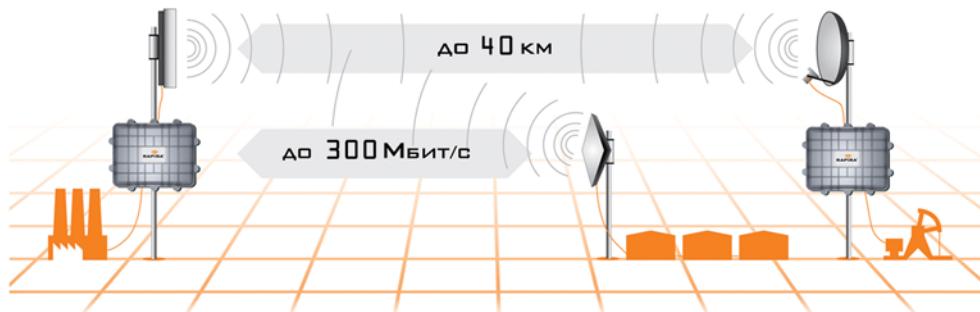


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

г. Москва, ул. Пржевальского д. 2

тел. + 7- 495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал.....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Масовая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

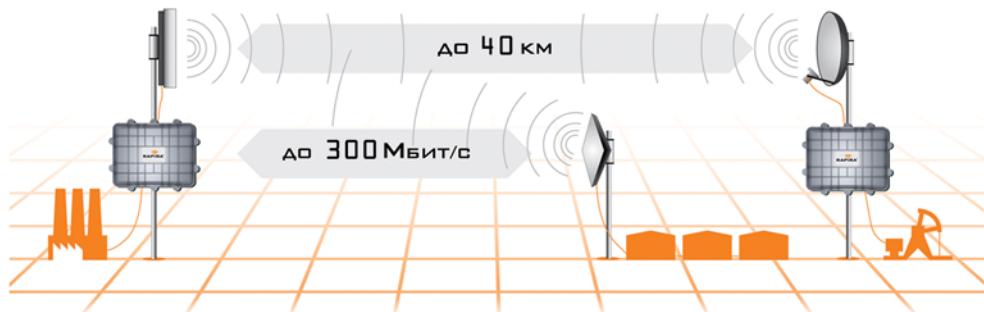


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX.....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

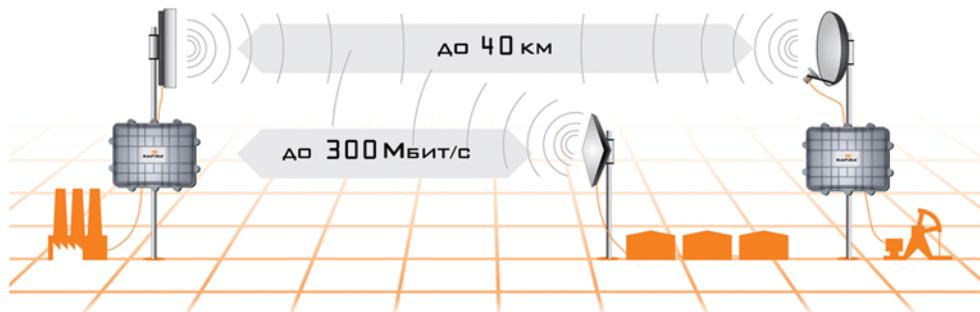


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

г. Москва, ул. Пржевальского д. 2

тел. + 7- 495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

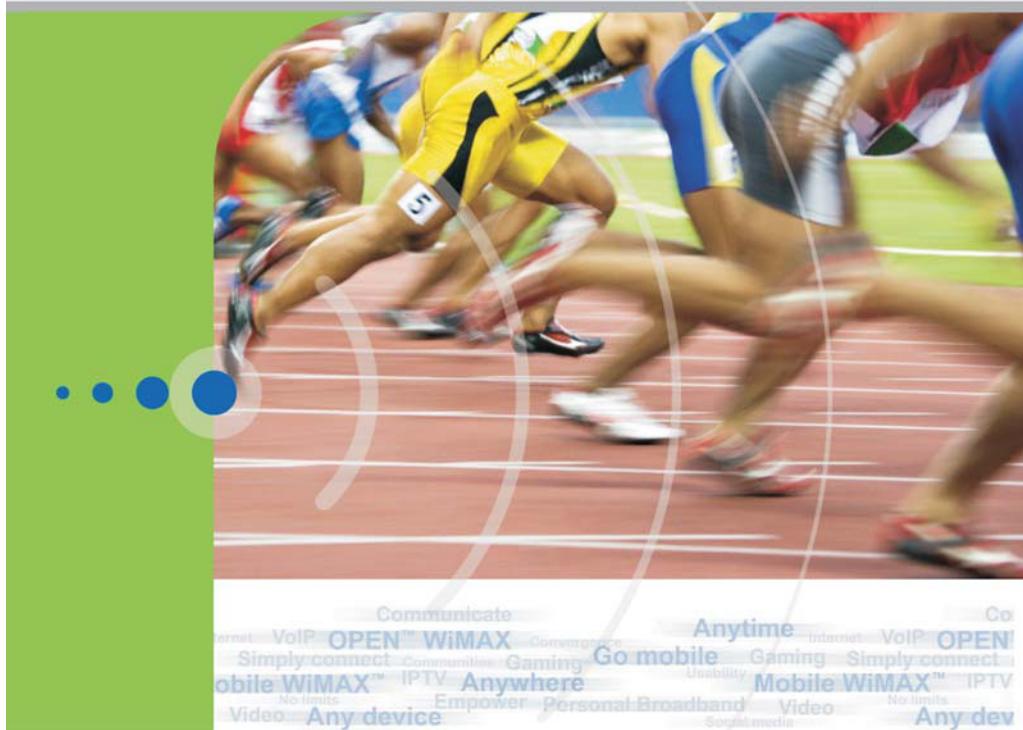
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

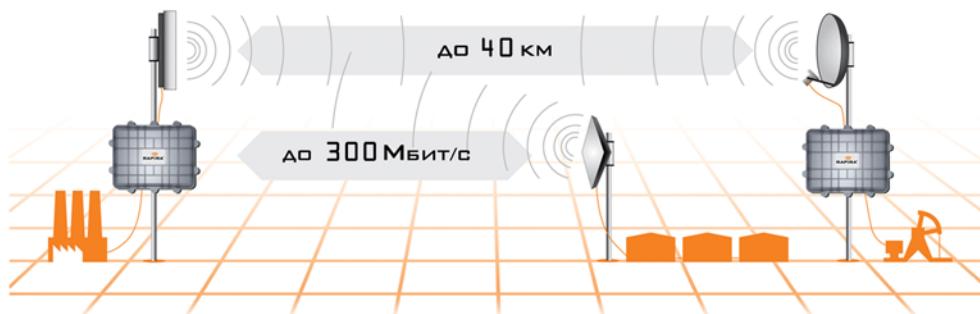


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

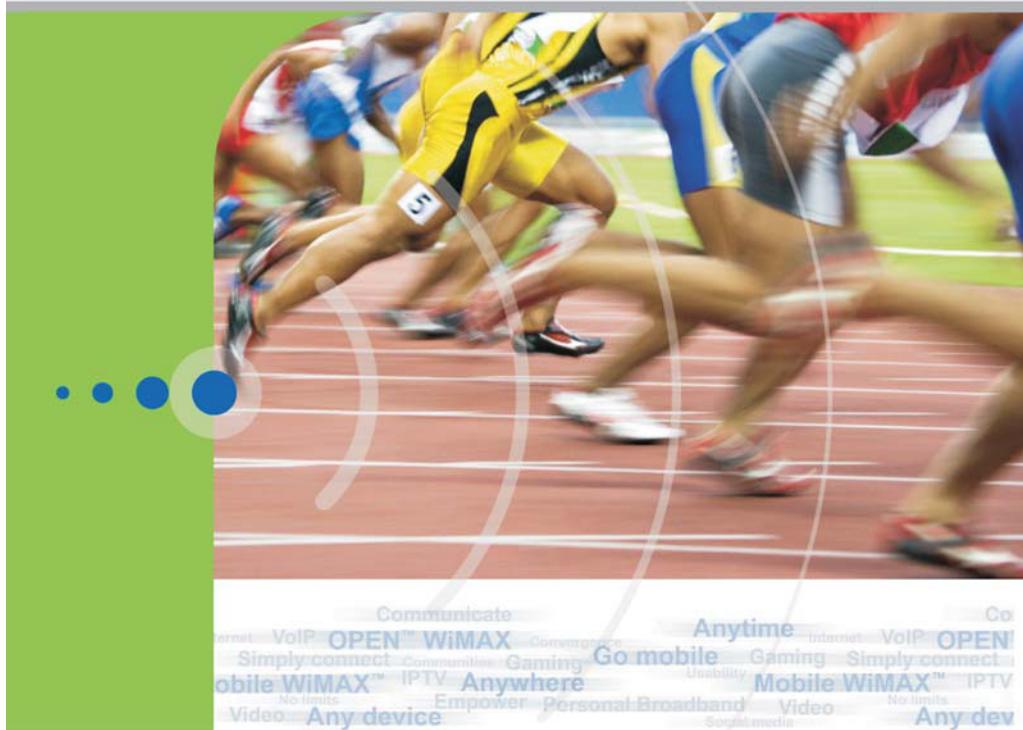
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

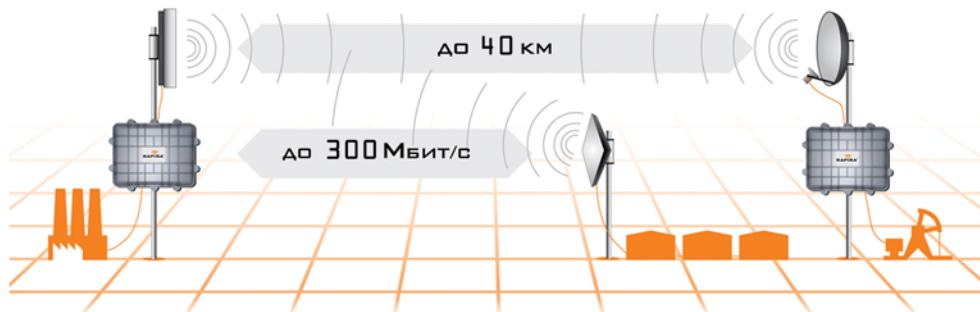


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1. Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1. Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2. Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2. Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1. Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2. Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3. Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4. Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5. Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6. Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1. Канальное кодирование.....	294
7.4.2. Структура кадров.....	296
7.5. Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1. Канальное кодирование.....	301
7.5.2. Структура кадров .....	304
7.5.3. Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4. Mesh-сеть.....	306
7.6. Режим OFDMA.....	309
7.6.1. Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2. Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3. Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4. Восходящий канал.....	314
7.6.5. Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7. Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1. Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2. Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8. Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9. Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1. Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2. Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3. Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10. Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1. Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2. Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....****353**

8.1. Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2. Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Масовая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

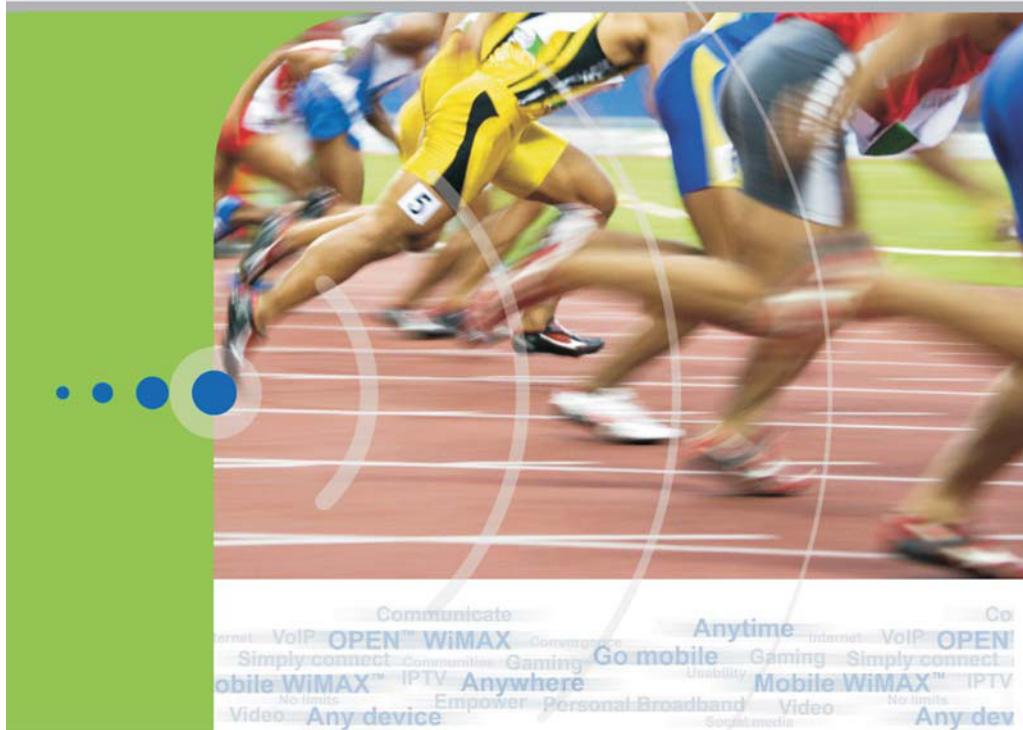
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

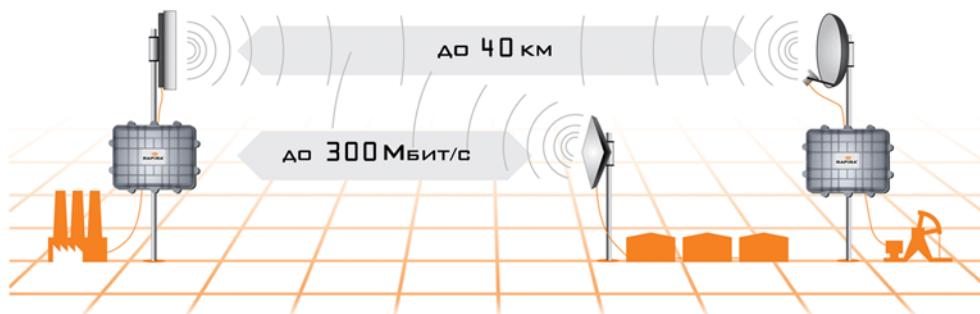


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



тел: (495) 721-8493 факс: (499) 144-4409

[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru) [info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX.....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» («Information Flow in Large Communication Nets», 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» («On Distributed Communications»). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

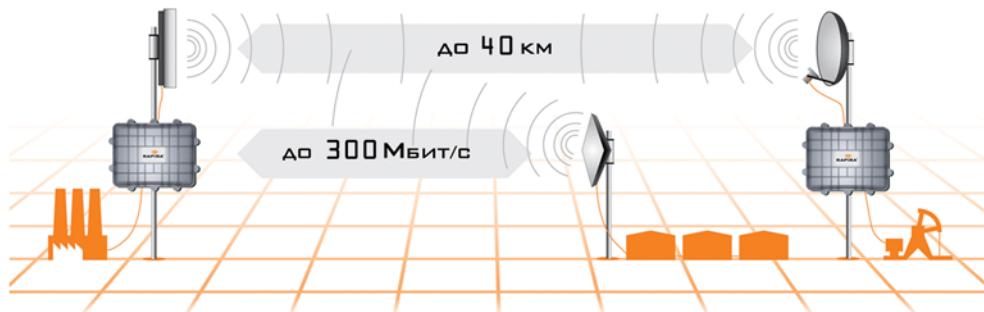


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1. Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1. Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2. Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2. Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1. Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2. Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3. Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4. Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5. Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6. Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1. Канальное кодирование.....	294
7.4.2. Структура кадров.....	296
7.5. Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1. Канальное кодирование.....	301
7.5.2. Структура кадров .....	304
7.5.3. Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4. Mesh-сеть.....	306
7.6. Режим OFDMA.....	309
7.6.1. Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2. Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3. Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4. Восходящий канал.....	314
7.6.5. Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7. Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1. Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2. Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8. Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9. Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1. Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2. Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3. Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10. Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1. Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2. Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....****353**

8.1. Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2. Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,

мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.



Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX–форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

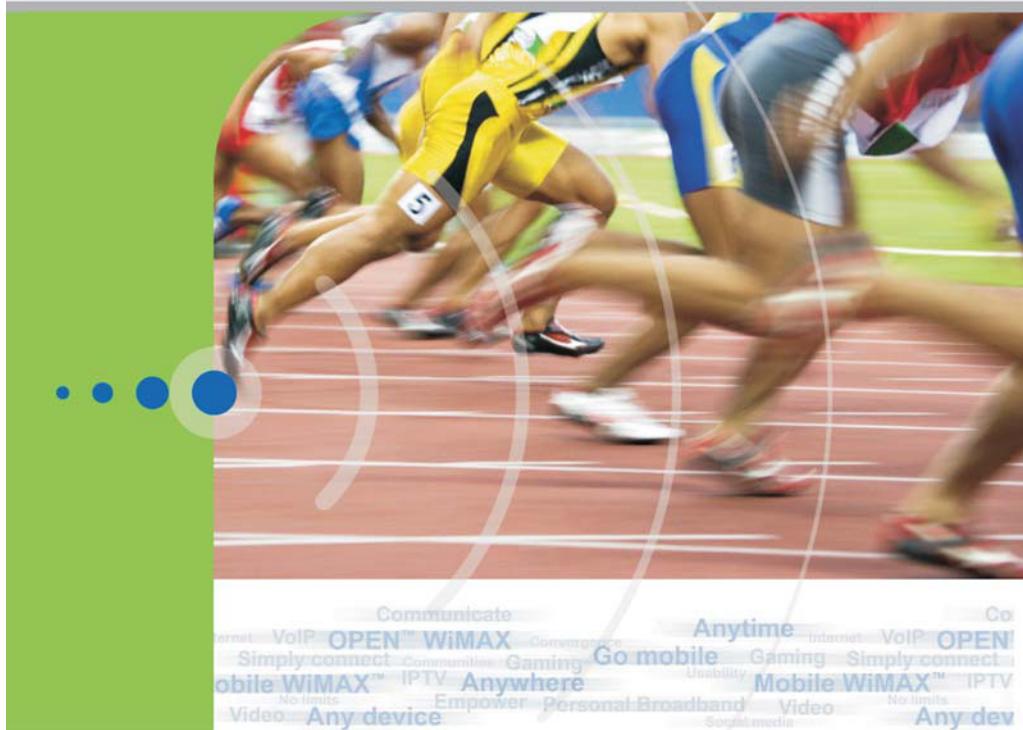
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

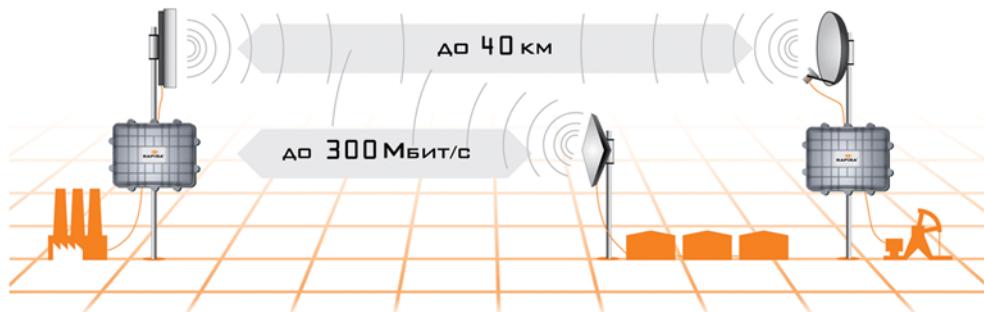


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

г. Москва, ул. Пржевальского д. 2

тел. + 7- 495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



ДЭЙТЛайн

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409

[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)    [info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал.....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

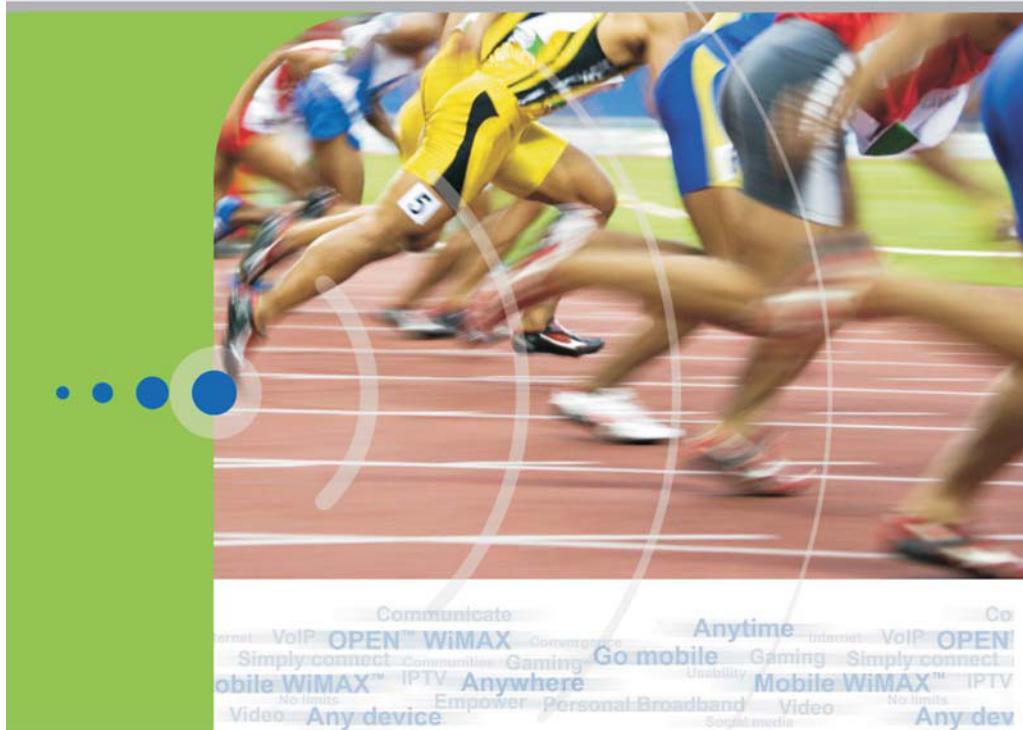
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

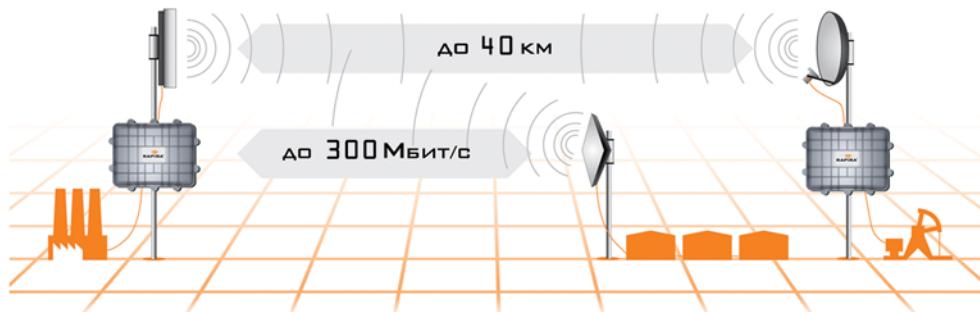


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛайн**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал.....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,

мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.



Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

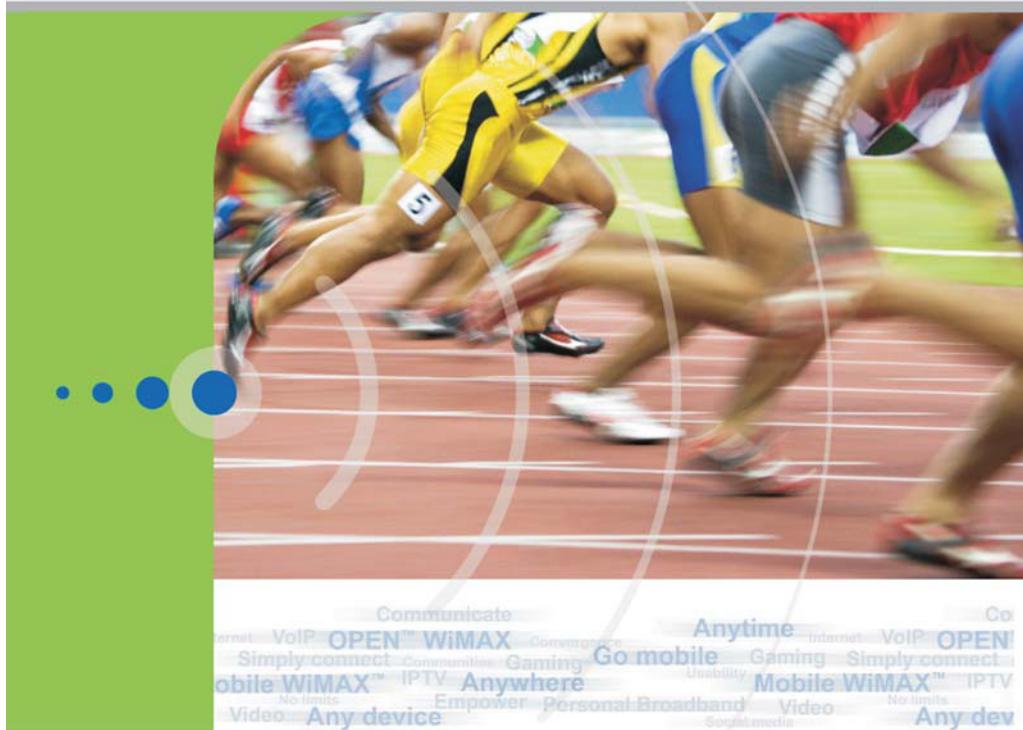
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



Communicate  
Internet, VoIP, OPEN™ WiMAX, Convergence  
Simply connect, Communities, Gaming  
mobile WiMAX™, IPTV, Anywhere  
No limits, Empower, Personal Broadband  
Video, Any device

Anytime  
Internet, VoIP, OPEN™ WiMAX, Co  
Gaming, Simply connect, Mobile WiMAX™, IPTV  
Usability, Video, Social media  
Any dev

## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

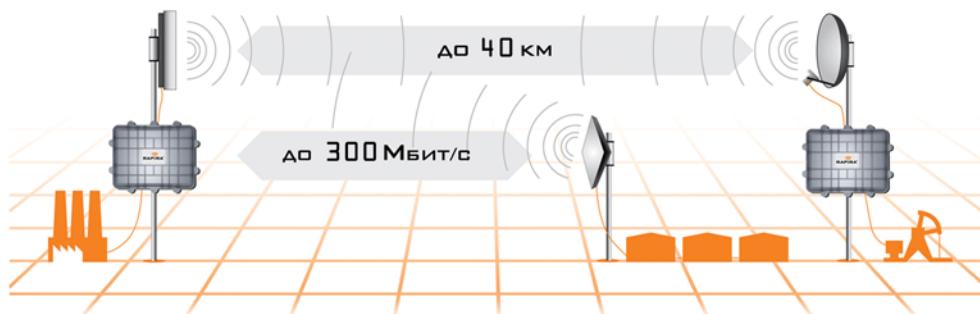


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛайн**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

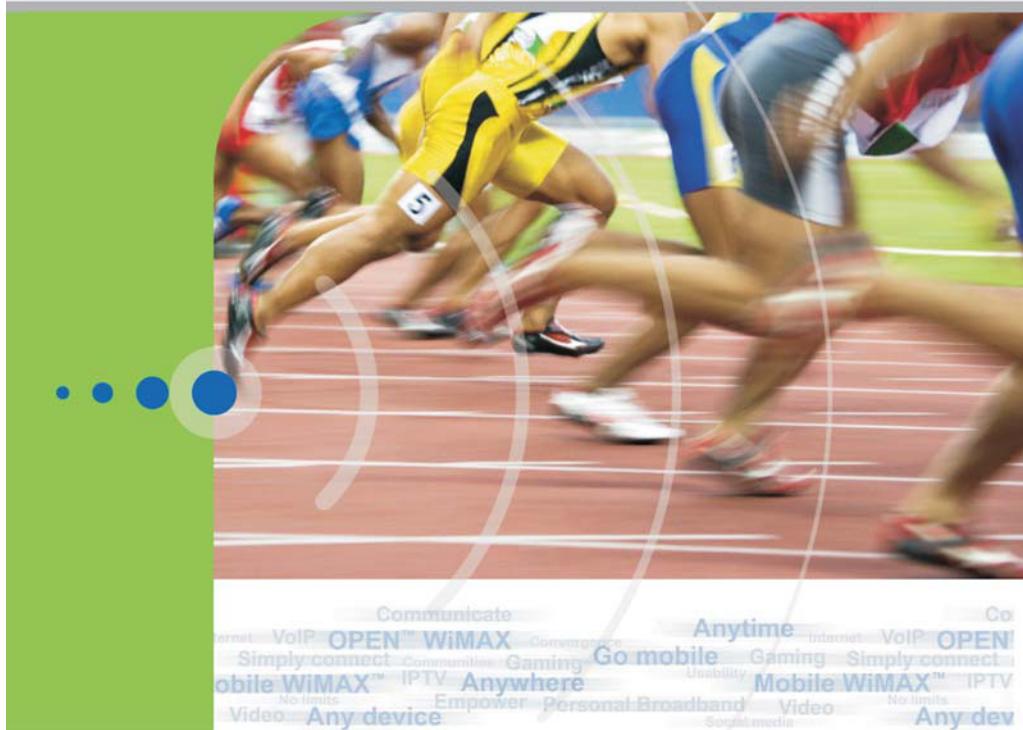
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

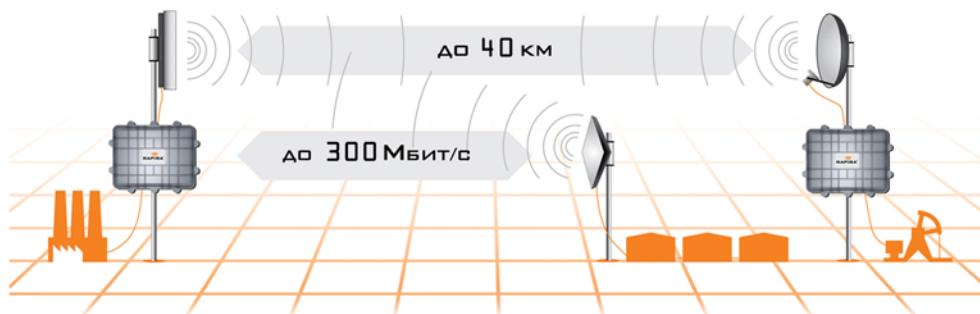


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал.....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

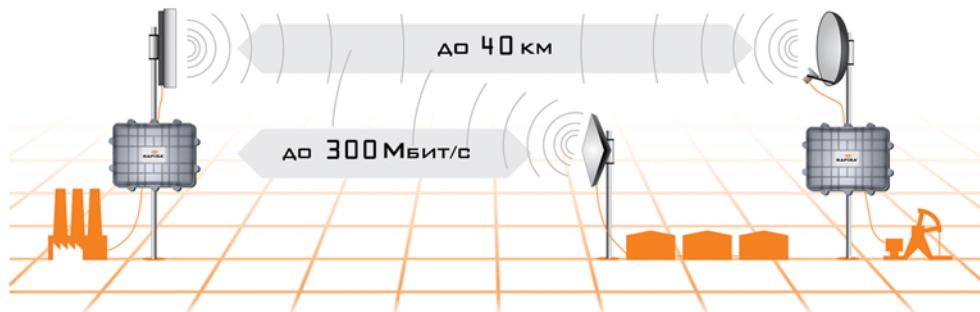


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал .....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS .....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

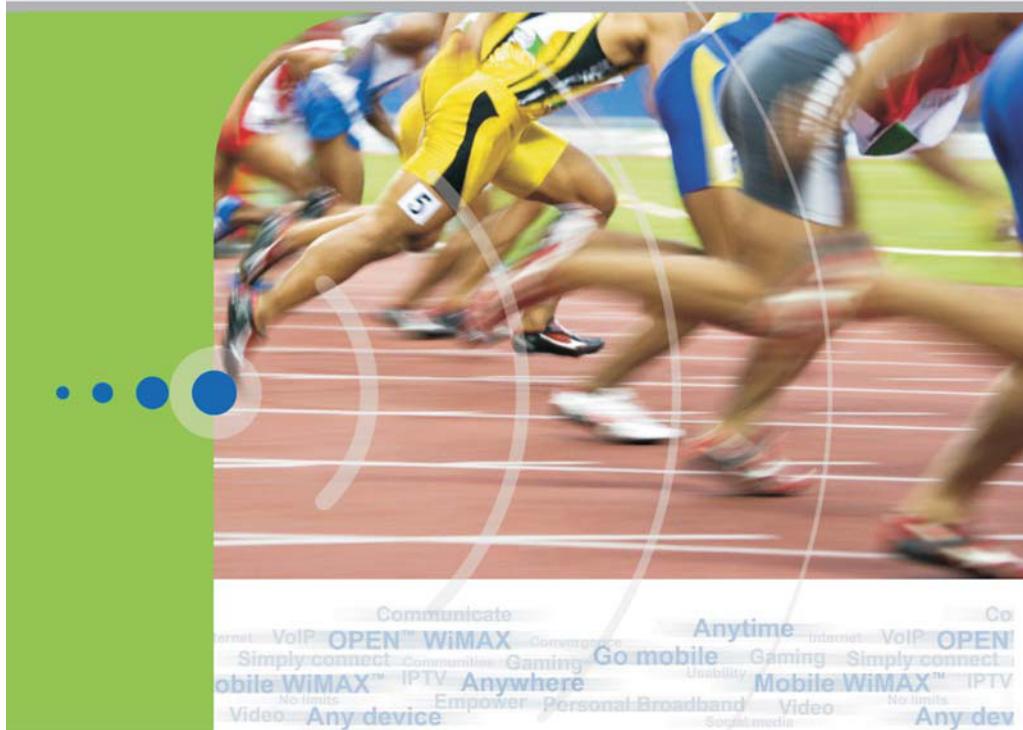
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

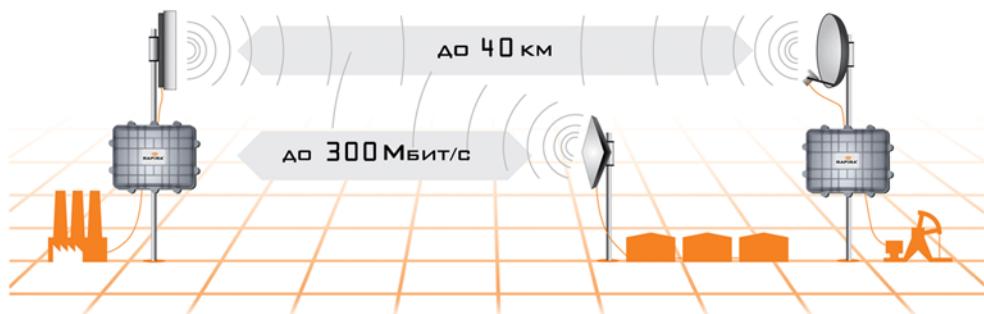


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформились в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

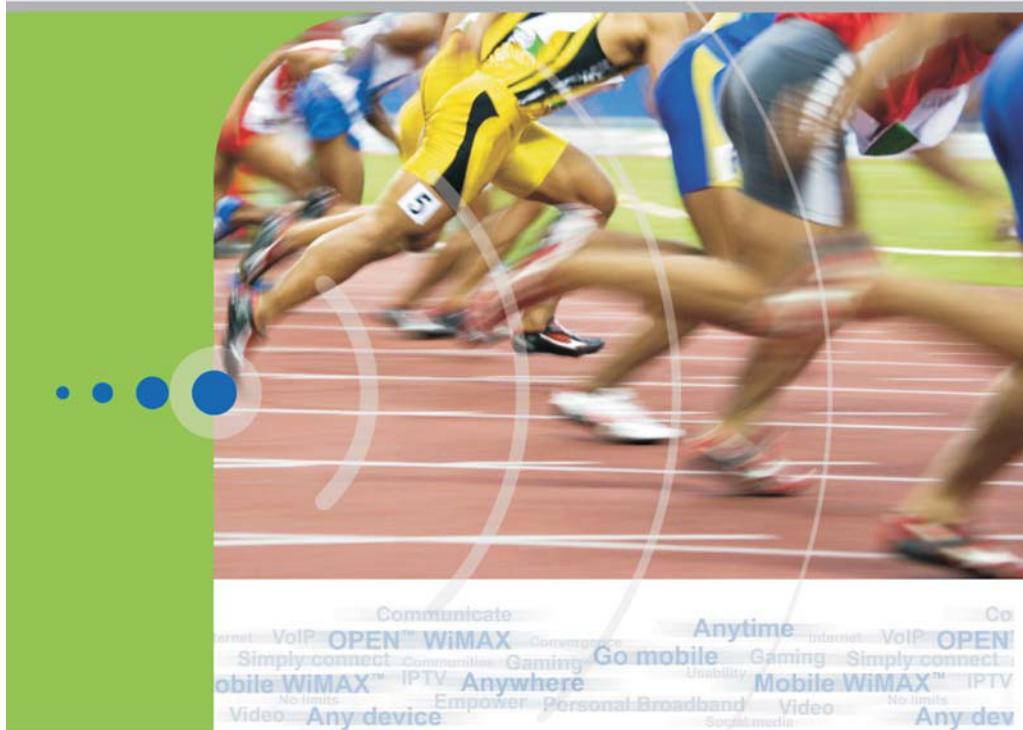
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

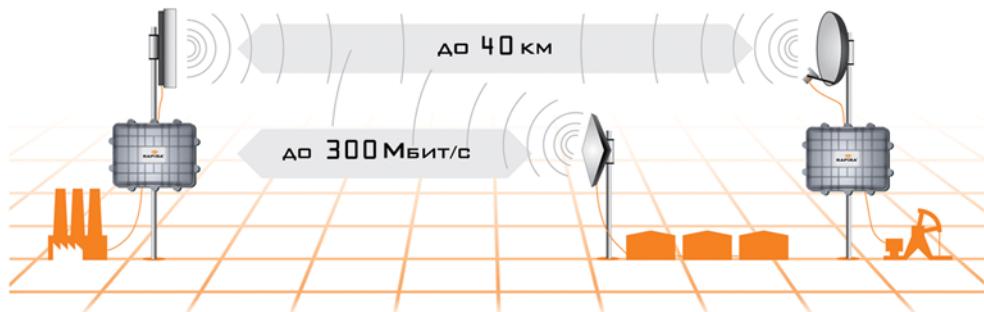


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1. Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1. Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2. Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2. Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1. Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2. Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3. Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4. Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5. Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6. Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1. Канальное кодирование.....	294
7.4.2. Структура кадров.....	296
7.5. Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1. Канальное кодирование.....	301
7.5.2. Структура кадров .....	304
7.5.3. Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4. Mesh-сеть.....	306
7.6. Режим OFDMA.....	309
7.6.1. Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2. Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3. Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4. Восходящий канал.....	314
7.6.5. Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7. Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1. Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2. Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8. Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9. Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1. Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2. Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3. Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10. Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1. Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2. Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1. Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2. Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

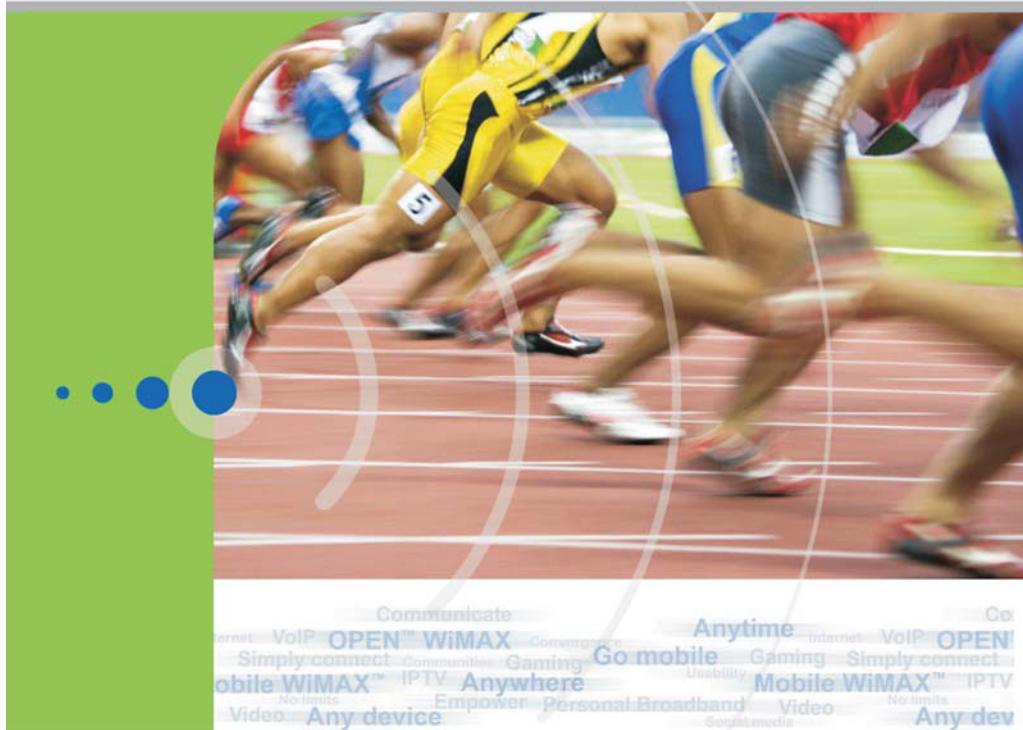
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

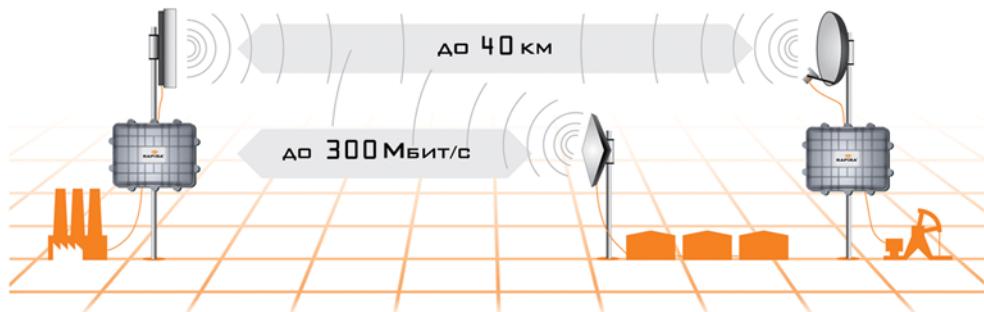


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

г. Москва, ул. Пржевальского д. 2

тел. + 7- 495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



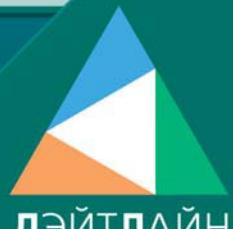
Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX.....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

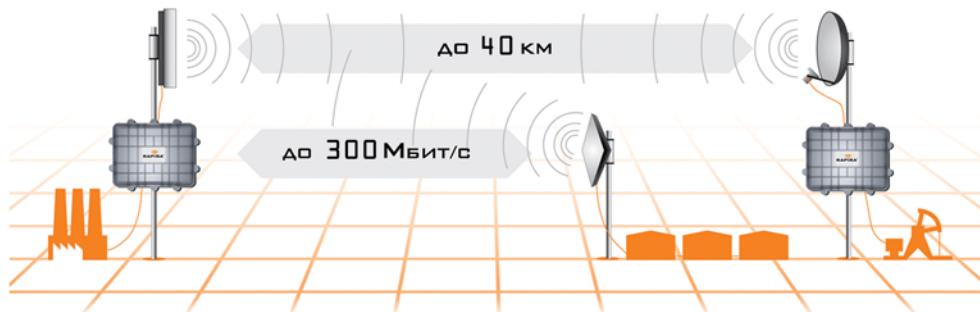


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал .....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS .....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Масовая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

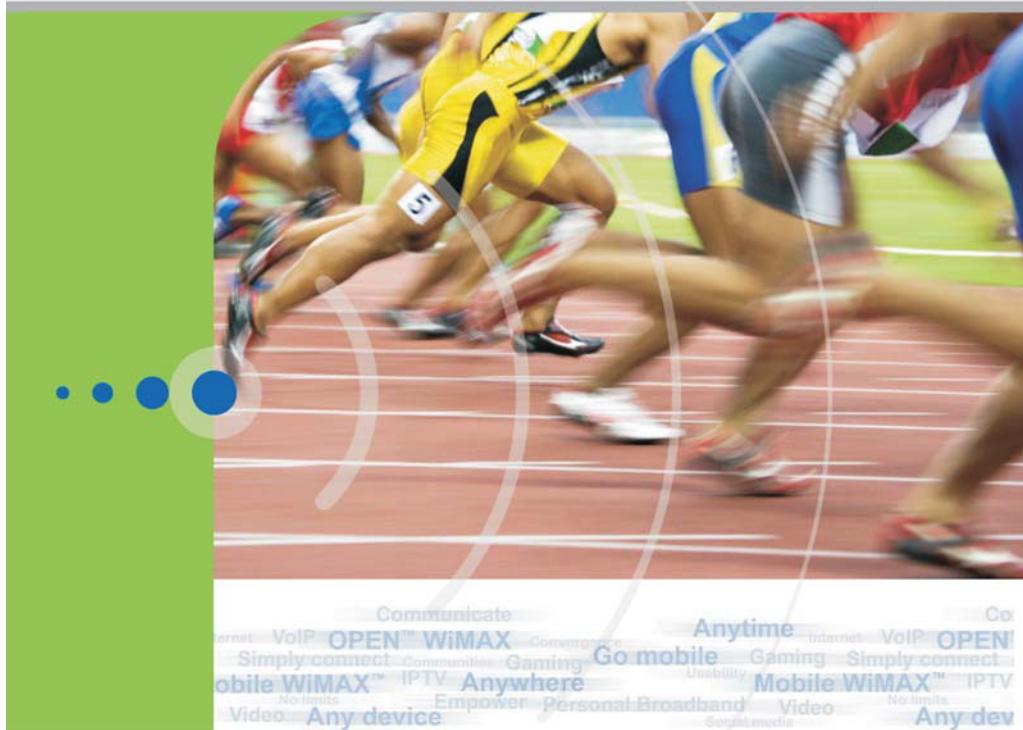
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

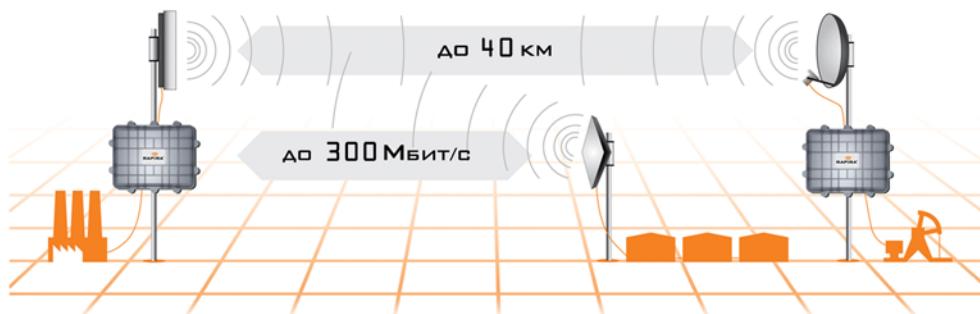


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимильная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

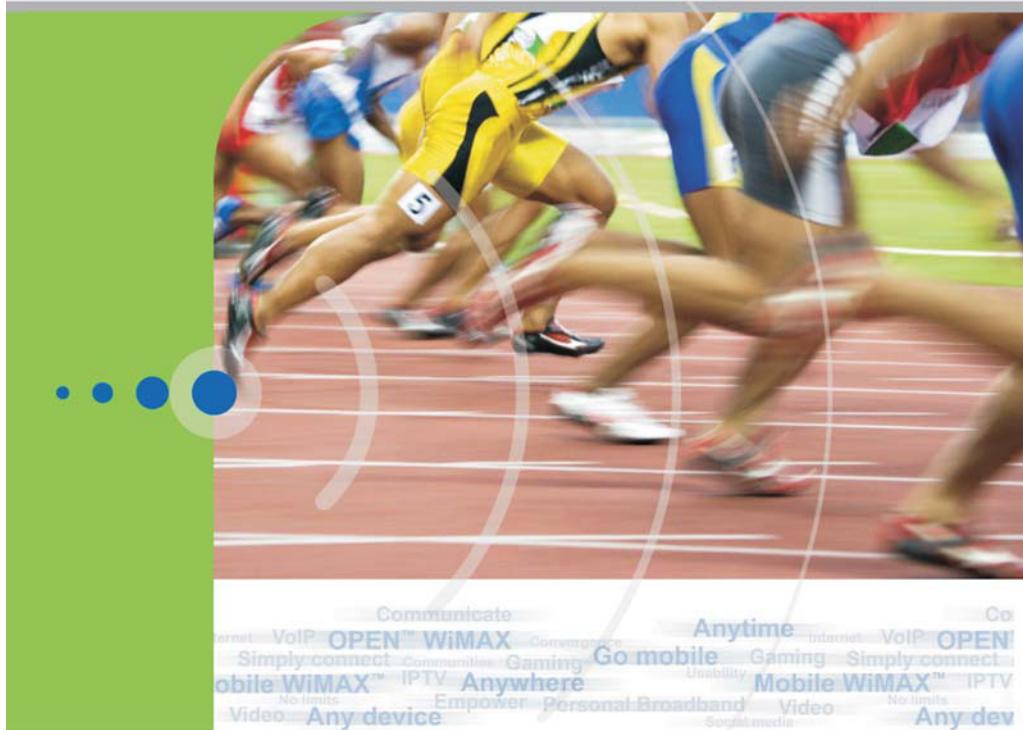
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

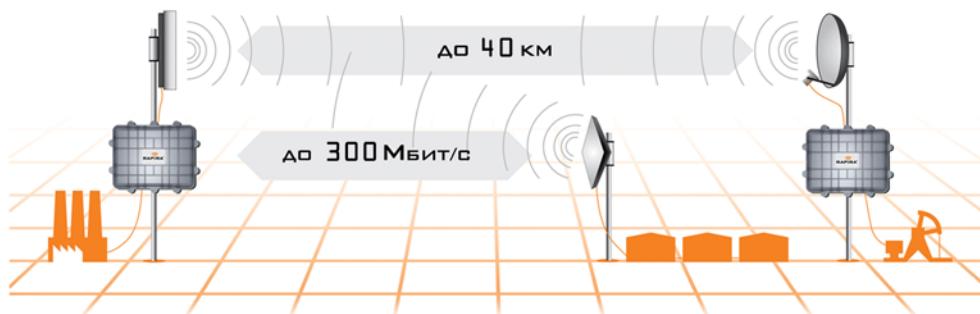


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)



## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



ДЭЙТЛайн

тел: (495) 721-8493 факс: (499) 144-4409

[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru) [info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы различные промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит/с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды .....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

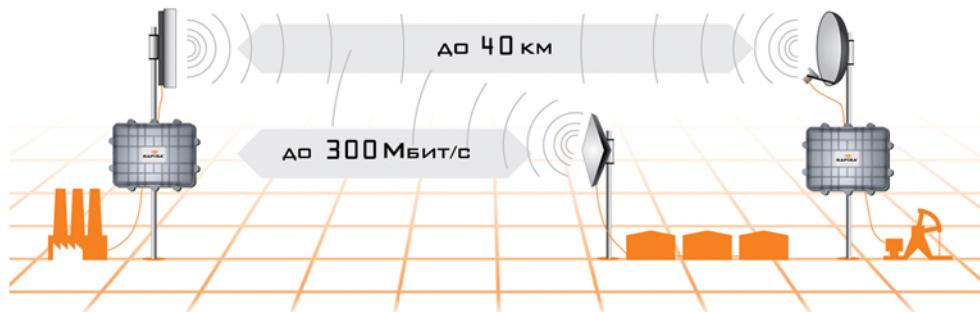


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)  
г. Москва, ул. Пржевальского д. 2  
тел. +7-495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409



[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)



[info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа**

<b>IEEE 802.16 .....</b>	282
--------------------------	-----

7.1.    Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.    Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.    Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.    Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.    MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.    Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.    Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.    Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.    Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.    Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.    Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.    Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.    Канальное кодирование.....	294
7.4.2.    Структура кадров.....	296
7.5.    Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.    Канальное кодирование.....	301
7.5.2.    Структура кадров .....	304
7.5.3.    Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.    Mesh-сеть.....	306
7.6.    Режим OFDMA.....	309
7.6.1.    Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.    Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.    Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.    Восходящий канал.....	314
7.6.5.    Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.    Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.    Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.    Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.    Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.    Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.    Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.    Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.    Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.    Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.    Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.    Проект IEEE 802.16m .....	346
Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

8.1.    Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.    Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук, заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (комерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней милю» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устраниТЬ крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с CCITT в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hoping Spread Spectrum и THSS — Time Hoping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100

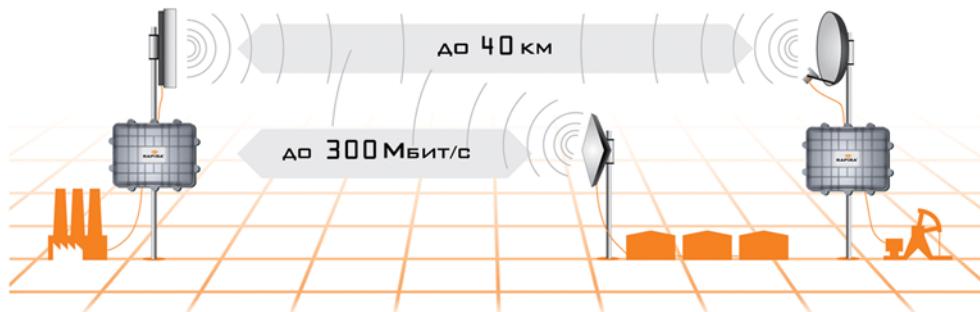


DreamAccess  
[www.dreamaccess.ru](http://www.dreamaccess.ru)

  
**RAPIRA**  
[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

## Новейшие системы широкополосных беспроводных систем связи

- Разработка и реализация проектов беспроводных локальных и региональных сетей мультимедийной информации
- Поставка всего спектра оборудования под ключ



[www.nporapira.ru](http://www.nporapira.ru)

г. Москва, ул. Пржевальского д. 2

тел. + 7- 495-980-88-75



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188

# МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ **СЕТИ**



Разработка, проектирование  
Радиочастотный консалтинг  
Поставка, монтаж, обслуживание  
Обучение специалистов  
Проектное финансирование, лизинг  
Аудит сетей связи и передачи данных

WiMAX F-BWA W-DSL Wi-Fi SDH



**ТЕХНОЛОГИИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ВРЕМЯ**

Научно-производственный центр «Дэйтайн»



**ДЭЙТЛАЙН**

тел: (495) 721-8493    факс: (499) 144-4409

[www.dateline.ru](http://www.dateline.ru)    [info@dateline.ru](mailto:info@dateline.ru)



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne) .....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

# КОНЦЕРН «СОЗВЕЗДИЕ»

## AstraMAX – комплексное решение для сетей мобильного WiMAX

### Оборудование AstraMAX

#### Базовая станция



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Ширина полосы радиосигнала: 3,5 МГц,  
5 МГц, 7 МГц, 10 МГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 40 Мбит/с на сектор

Метод дуплекса: FDD, TDD

Модуляция:

в прямом канале QPSK, 16QAM и 64QAM  
в обратном канале QPSK, 16QAM

Технология пространственного разнесения  
- SISO и MIMO 2x2

Интерфейс: Ethernet

Оборудование AstraMAX базируется  
на радиотехнологии мобильного  
WiMAX (стандарт IEEE 802.16e-2005)



#### Абонентские устройства



Диапазон частот: 2,3 – 2,7 ГГц  
или 3,4 – 3,6 ГГц

Максимальная скорость передачи данных:  
до 13 Мбит/с

Интерфейс: Ethernet

Система AstraMAX адаптирована к  
условиям Российского рынка.  
Оборудование сертифицировано по  
системе сертификации в области  
связи (сертификат соответствия  
ОС-2-РД-0276, декларация о  
соответствии Д-РД-0750).

Оборудование нового поколения AstraMAX дает возможность  
полностью отказаться от проводов, быть мобильным и всегда  
оставаться на связи!

394018, г.Воронеж, ул Плехановская, 14, тел.: (4732) 35-61-89, e-mail: vvs@sozvezdie.su

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353

# ПЕРВАЯ МИЛЯ

## LAST MILE

Журнал «Первая миля» выпускается как приложение к авторитетному отечественному журналу «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука Технология, Бизнес».

**Издатель** – ЗАО «РИЦ «Техносфера»

**Цель издания** – комплексное освещение вопросов и проблем, связанных с организацией доступа абонентов и групп абонентов к глобальным сетям передачи информации.

**Журнал рассматривает такие вопросы, как:**

- Последние достижения и перспективы в области технологий «последней мили»
- Принципы построения сетей доступа
- Телекоммуникационные протоколы и технологии «последней мили»
- оборудование для коммутируемых и некоммутируемых проводных линий
- оборудование для беспроводных широкополосных сетей доступа
- оборудование для атмосферных оптических линий и др.
- «сельская» связь
- Вопросы экономики и бизнеса телекоммуникационной индустрии применительно к сектору «последней мили» и системам абонентского доступа.

Журнал публикует как зарубежную информацию, так и материалы о российском рынке оборудования и услуг.





## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



## Обращение к читателям



В настоящее время научно-техническое общество активно обсуждает концептуальные вопросы сетей связи следующих поколений. Поэтому как нельзя более своевременной стала книга известных российских специалистов В.М. Вишневского, С.Л. Портного, И.В. Шахновича «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Поставив перед собой непростую задачу — рассмотреть эволюцию беспроводных сетей передачи информации, авторы сумели отразить в монографии не только практические все технические аспекты этой проблемы (технологии, кодирование, системы модуляции, стандартизацию, безопасность и т. д.), но и вопросы частотного обеспечения, нормативно-правового регулирования и другие. В результате получилось уникальное инженерно-техническое издание, в котором сочетается строгий научный подход и простота изложения, что дало авторам

полное право назвать ее «энциклопедией». И хотя статьи здесь расположены не в алфавитном порядке (как принято в энциклопедических изданиях), обширность материала и полнота сведений ставят эту книгу в один ряд с лучшими монографиями по телекоммуникациям. При этом авторам удалось избежать и другой крайности, которая подстерегала их при анализе многотомных спецификаций подкомитетов IEEE и других организаций — избыточности описания, ненужной детализации, мелких частных подробностей. Сегодня важно представить широкому кругу специалистов не столько подробную информацию о новых телекоммуникационных технологиях и оборудовании (ее, при желании, всегда можно отыскать в Интернете), сколько показать основные тенденции развития телекоммуникационных систем.

В сетях связи последующих поколений широкополосный доступ займет исключительно важное место, представляя собой одну из фундаментальных составляющих концепции NGN. К нему приковано особое внимание операторов связи и разработчиков нового оборудования. Деятельность по предоставлению услуг широкополосного доступа с большой долей вероятности станет новой крупной нишей телекоммуникационного рынка и уже одно это вызывает повышенный интерес к ним как со стороны различного рода инвесторов, так и государственных деятелей и политиков, регуляторов рынка. При рассмотрении проблем широкополосного доступа активно дискутируется вопрос о роли проводных, беспроводных и космических средств связи. Несмотря на различные взгляды на соотношение этих средств, эксперты едины во мнении, что широкополосные беспроводные сети на базе технологий сотовой связи третьего поколения, а также технологий Wi-Fi и WiMAX обладают сегодня исключительными преимуществами по оперативности развертывания, охвату территории,



мобильности, представляя во многих случаях не только наиболее эффективное, но иногда и единственно возможное экономически оправданное решение. Это особенно важно для Российской Федерации, с нашей необъятной территорией и значительным разбросом населения, особенно в сельской местности.

Завершается монография взглядом на путь к четвертому поколению сетей связи широкополосного беспроводного доступа. Здесь, конечно, не все так однозначно и просто, как представляется авторам. Научные споры по выбору технологий будущих сетей ведутся непрерывно, и доводы, приведенные в монографии, безусловно интересны всем, кому предстоит принять непростые решения.

Хочу выразить слова благодарности создателям представляемой монографии, выпуском которой они вносят ценный вклад в развитие телекоммуникаций России, повышение общего инженерного уровня персонала отрасли связи, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также в подготовку нового поколения специалистов отрасли. Появление в России книг, подобных «Энциклопедии WiMAX. Путь к 4G», — еще один, пусть маленький, но очень нужный шаг в продвижении нашей страны к современному информационному обществу.

Наум Семенович Мардер, доктор технических наук,  
заместитель Министра связи и массовых коммуникаций Российской Федерации

## **Address to the readers by the WiMAX Forum president Ron Resnick**



Dear readers! Let me congratulate you on the new book «WiMAX encyclopedia. Way to 4G» appearance. Why is it so important nowadays?

The world population is 6.75 billion people, 4.05 of which use various types of telephone communication cellular networks, 3.5 billion use the Internet and only half of a billion use a broadband wireless access to diverse networks. Modern technologies and progress in general causes the rapid growth of broadband wireless access. However, the growth is restricted by various factors including necessity of large financial expenditures on the global networks infrastructure. It took mankind more than a century to develop a global telephone network; this very network was used for the Internet access at the first stage of its development. Howev-

## **Обращение к читателям Президента WiMAX-форума Рона Резника**

Уважаемые читатели! Позвольте поздравить вас с появлением книги «Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G». Почему она столь важна именно сегодня?

Население планеты Земля насчитывает 6,75 миллиарда человек, 4,05 из которых пользуются различными видами телефонной сотовой связи, 3,5 миллиарда пользуются Интернетом и только полмиллиарда обладают широкополосным мультимедийным доступом в различные сети. Современные технологии и прогресс человечества в целом диктуют стремительный рост широкополосного доступа. Однако этот рост сдерживают различные факторы, в том числе — необходимость огромных финансовых вложений в инфраструктуру всемирных сетей. Человечество затратило больше 100 лет для развития инфраструктуры всемирной телефонной сети общего пользования, именно эта сеть использовалась для доступа в Интернет на первом этапе его развития. Однако очень скоро стало ясно, что для широкополосного доступа нужны новые сети. Чтобы не строить их еще 100 лет, естественно использовать развитые технологии подвижной радиосвязи.

Таким образом, широкополосные беспроводные сети передачи информации становятся одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии. А для стран, в которых большая территория сочетается с невысокой плотностью населения, беспроводные сети имеют особое значение,



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

nologies, equipment and network architecture are fully represented in this monograph. That is why this book is rightly called «WiMAX encyclopedia». I believe it is vital that authors didn't confine themselves to the only technology. There are descriptions of related and rival standards in the book as well, which make it possible for a thoughtful reader to arrive at a conclusion himself about the future of the global mobile telecommunications.

All stated above makes this book a unique and actual publication which will surely make a contribution to the development of the 4G networks. This book is equally useful for everyone who deals with development, using or adjusting of the broadband wireless systems, but first of all for those who deals with WiMAX. Go for it!

WiMAX Forum President  
*Ron Resnick*

Ron Resnick

Мне представляется важным, что авторы не ограничились описанием только одной технологии. В книге рассказано о смежных и конкурирующих стандартах, что позволяет вдумчивому читателю прийти к самостоятельным выводам о перспективах развития глобальных мобильных телекоммуникаций.

Вот почему данная книга — это уникальная и своевременная работа, которая, безусловно, внесет свою лепту в дело развития сетей четвертого поколения. Она окажется одинаково полезной всем, кто так или иначе связан с разработкой, эксплуатацией и регулированием систем широкополосной беспроводной связи, но в первую очередь, конечно же, тем, кто связан с технологиями WiMAX. Дерзайте!

Президент WiMAX-форума  
Рон Резник

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов —名义ально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» («Information Flow in Large Communication Nets», 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» («On Distributed Communications»). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-

ре развития устоявшиеся системы классификации могут устаревать. Все это справедливо и для беспроводных сетей передачи информации (БСПИ). Поэтому остановимся на наиболее популярных способах ранжирования различных беспроводных систем. Обычно БСПИ подразделяют по:

- способу обработки первичной информации — на цифровые и аналоговые;
- ширине полосы передачи — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- локализации абонентов — на подвижные и фиксированные;
- географической протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- виду передаваемой информации — на системы передачи речи, видеоинформации и данных.

Вполне справедливы и системы градации на основе используемой технологии (спутниковые сети, атмосферные оптические линии и т. п.), по назначению и др.

Все рассматриваемые в нашей монографии технологии относятся к цифровым беспроводным широкополосным системам. Приведем их отличительные признаки, охарактеризовав и «сопредельные» системы. Термин «беспроводность» определяется легко — отсутствует соединительный провод (оптоволоконный или медный кабель). Также относительно просто определить, цифровая система или нет. К цифровым относят системы, у которых входная аналоговая информация (например, голос, аналоговый телевизионный сигнал и т. п.) первоначально преобразуется в цифровую (дискретную) форму. Однако уже здесь возникает некоторая нечеткость. В самом деле, любой сигнал при передаче через физический канал имеет чисто аналоговый вид, он в принципе не должен быть дискретным (чем дальше форма сигнала от бесконечной синусоиды, тем больше паразитных гармоник и связанных с ними неприятностей), чего добиваются специальными методами. Поэтому термин «цифровая система» говорит только о том, что в ней входящие аналоговые данные оцифрованы и обрабатываются (фильтрация, скремблирование, коммутация) преимущественно цифровыми методами.

Еще сложнее с шириной полосы. Строгого определения тут нет. С технической точки зрения обычно полагают, что если ширина спектральной полосы  $F$ , в которой работает система, много меньше центральной частоты этой полосы  $f_c$ , то система узкополосная (т. е.  $F/f_c \ll 1$ ). В противном случае система широкополосная. Критерий весьма расплывчат. В области цифровых систем передачи приводят и другие определения широкополосности [5]: например, система широкополосная, если передаточная функция канала в этой полосе существенно изменяется в зависимости от частоты (т. е. передаточная функция в рабочей полосе узкополосной системы практически не зависит от частоты). Очевидно, что определения эти достаточно расплывчаты.

С пользовательской точки зрения широкополосным доступом называют доступ к ресурсам с некой «достаточной» скоростью, причем эта скорость постоянно увеличивается. Еще не так давно к широкополосным относили скорости в 64 кбит/с, а скоро уже мегабитные скорости не будут являться широкополосными в полном смысле. Поэтому под термином «широкополосная система» мы будем понимать такие системы, где проявляются специфические эффекты и свойства,



связанные с широкой рабочей полосой частот, на уровне 1,25–40 МГц и выше. Более строгий критерий едва ли возможен.

Подразделение на мобильные и подвижные системы, казалось бы, столь простое, на самом деле также не является тривиальным. Следует различать собственно возможность мобильности абонентов, предоставляемую технологией, и подразделение на мобильную и фиксированную службы связи, связанное с вопросами частотного распределения и лицензирования. Наиболее характерным примером такой двусмысленности является история появления в России беспроводной телефонной связи стандарта IS-95 (CDMA). Оборудование этого стандарта изначально было разрешено к использованию в нашей стране только для предоставления услуг фиксированной связи. Однако, как известно, IS-95 является стандартом мобильной сотовой связи.

Технологически его никак нельзя «записывать». Аналогичная неопределенность сложилась сейчас и в спутниковой связи. Если же говорить с технической точки зрения, ограничивать мобильность может чувствительность технологии связи к скорости движения абонента, сложность перехода из одной зоны обслуживания в сопредельную без разрыва связи, восприимчивость к кратковременным пропаданиям связи и т. п.

Подразделение по размеру зоны обслуживания также достаточно условно, если рассматривать соседние градации. К персональным сетям (WPAN — wireless personal area network) относят системы с радиусом действия от сантиметров до нескольких метров (до 10–15 м). Основное назначение таких сетей состоит в замещении кабельной системы для связи оборудования (например, компьютера и периферийных устройств). При этом мощность излучения передатчиков, как правило, 1–10 мВт. Локальные сети (WLAN — wireless local area network) подразумевают взаимную удаленность устройств на расстояние до сотен метров и мощности передатчиков порядка 100 мВт. Это сети, предназначенные для объединения устройств в пределах локальной зоны (здания, предприятия и т. п.). Отметим, что на основе стандартов локальных беспроводных сетей вполне успешно строят и сети городского масштаба. Например, в этом качестве используют такие технологии, как DECT и IEEE 802.11.

К сетям городского масштаба (региональным) можно отнести множество различных технологий. Это и наземное теле- и радиовещание, и сотовая связь, и транкинговые системы. Изначально стандарт IEEE 802.16 также задумывался как система региональной (городской) связи. Если же говорить о глобальных беспроводных системах передачи данных, то они представлены спутниковыми системами связи. Однако с учетом того, что, например, практически все сети сотовой телефонии так или иначе связаны друг с другом, все они разрабатываются с учетом возможности взаимодействия, можно (правда, с некоторой натяжкой) говорить и о глобальных сотовых сетях. Аналогична ситуация и с развитием IEEE 802.16 — сети мобильного WiMAX претендуют именно на глобальность.

Особой градацией является подразделение в зависимости от типа передаваемой информации, например, на системы передачи речи (или видеинформации) и несинхронных данных. С одной стороны, речь — это один из видов информации. После оцифровки поток речевых данных по виду неотличим от потока любой другой информации. Развитие цифровых технологий в различных областях телекоммуникаций (например, в проводной телефонии) давно проде-

монстрировало эффективность цифровых методов обработки, когда и речь, и данные обрабатываются едиными способами. С другой стороны, потребность в информации разного вида уже сделала реальной интеграцию различных информационных сетей (телефония, телевидение, сети передачи цифровых данных, телеметрия) на бытовом уровне. По единому каналу передаются данные самой различной природы. Поэтому можно достаточно уверенно предположить, что недалек тот день, когда вся речевая информация будет обрабатываться исключительно цифровыми методами. Здесь можно было бы остановиться, но возникает важный нюанс. Каждому виду информации свойственны характерные требования при передаче. Человек чувствует задержку передачи речи, когда она превышает 0,25 с. При задержках около 0,5 с восприятие речи для многих становится неприемлемым. Причем дело не только собственно в задержке, но и в неизбежном при дуплексной связи эхо-сигнале, который при таких задержках устранить крайне сложно. С другой стороны, речевая информация малочувствительна к спорадическим помехам и потерям данных. Это означает, что при пакетной передаче речи важно, чтобы задержки распространения сигнала в канале были минимальными, а маршрутизация и восстановление потока данных из пакетов (даже если их последовательность нарушена) происходили в реальном времени. При этом допустима даже потеря отдельных пакетов. Аналогична ситуация и с передачей видеинформации — задержка между приемом отдельных пакетов (например, MPEG-2) не должна превышать некоего заданного значения, но потеря пакета, как правило, допустима. Совершенно иные требования предъявляются к передаче телеметрической информации, текстовых данных и т. п. Здесь, как правило, не важен режим реального времени (в определенных пределах), но и недопустима потеря данных. Учет этих особенностей может приводить к созданию особых технологий, ориентированных на трансляцию определенных видов информации. Характерным примером было появление технологии Frame Relay — способа пакетной передачи, при котором не происходит проверок прохождения отдельных пакетов (в отличие от традиционных сетей пакетной коммутации X.25 с подтверждением и повторной передачей каждого пакета). В современных мультимедийных сетях для передачи разнородных данных необходимо введение дополнительных механизмов — приоритезации данных, системы обеспечения качества услуг (QoS) и т. п.

Приведенные выше рассуждения показывают, что любое определение, так или иначе ранжирующее БСПИ, не стоит воспринимать буквально и уж тем более не надо удивляться применению той или иной технологии «не по назначению».

### I.3. Стандартизация в области телекоммуникаций

Важнейшим аспектом развития современных телекоммуникационных систем является их стандартизация. Стандартизация необходима всем обитателям мира телекоммуникаций, включая производителей электронных компонентов, изготавителей аппаратуры, разработчиков сетей и конечных пользователей. Прежде всего, стандартизация означает массовость производства, что ведет к низким ценам и широкому распространению технологии. Разумеется, выбор и утверждение стандарта — это процесс не только технический, но и политический. Как правило, различные фирмы прорабатывают альтернативные варианты будущей

технологии. От того, какой из них будет утвержден в качестве стандарта, зависят и объемы будущих прибылей. Поэтому, чтобы стандарт действительно стал общепризнанным, стандартизирующая организация должна быть чрезвычайно авторитетной, а сама процедура утверждения — максимально открытой и беспристрастной.

«Головной» организацией в мире в области стандартизации в телекоммуникациях является Международный союз электросвязи (ITU — International Telecommunications Union), работающий под эгидой ООН. После реорганизации 1 марта 1993 г. два его сектора вошли в себя три важнейшие стандартизирующие организации. В сектор радиосвязи (ITU-R, ITU Radiocommunication Sector) вошли Международный консультативный комитет по радиовещанию (CCIR — International Radio Consultative Committee) и Международный комитет по регистрации радиочастот (IFRB — International Frequency Registration Board). До этого ключевую роль в распределении спектра играли именно эти организации. Они также занимались вопросами спутниковых систем связи, глобальных радиосистем и др. Сектор телекоммуникаций Международного союза электросвязи ITU-T (ITU Telecommunication Standardization Sector) стал преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (CCITT — Consultative Committee for International Telephone and Telegraphy), долгие годы издававшего свои знаменитые «цветные книги» — сборники стандартов в области телекоммуникаций. Третий сектор ITU — исследовательский сектор ITU-D — был создан на базе организованного в 1989 г. Бюро телекоммуникационных исследований (Telecommunication Development Bureau — TDB).

Надо отметить, что не случайно именно ITU играет главенствующую роль в области международных телекоммуникационных стандартов. История этой организации неразрывно связана с историей телекоммуникационной индустрии. Впервые аббревиатура ITU появилась почти полтора столетия (!) назад. 17 мая 1865 г. в Париже представители 20 государств приняли первую международную телеграфную конвенцию и учредили Международный телеграфный союз — International Telegraph Union (ITU). Напомним, тогда телеграф был единственным видом электросвязи! С 1885 г. ITU занимался и вопросами международной стандартизации телефонии. В 1906 г. под эгидой ITU в Берлине прошла первая международная конференция по вопросам радиотелеграфии, на которой была принята первая конвенция, заложившая основу того, что сегодня называют частотным регулированием.

К середине 1920-х годов были основаны Международные консультативные комитеты в области телефонии (The International Telephone Consultative Committee — CCIF, 1924), телеграфии (The International Telegraph Consultative Committee — CCIT, 1925) и радиовещания (CCIR, 1927). В 1932 г. в Мадриде ITU обрел свое современное название — International Telecommunication Union (официальная дата переименования — 1 января 1934 г.). 15 октября 1947 г. в Атлантик-Сити ITU получил статус агентства только что созданной ООН. В том же году был основан и Международный комитет по регистрации радиочастот IFRB. В 1956 г. CCIT и CCIF слились в единую организацию CCITT. 1 марта 1993 г. завершилась одна из крупнейших реорганизаций, в результате чего ITU обрел свой современный вид. Отметим, что структура ITU как нельзя лучше отражает ситуацию в области современных телекоммуникаций:

тесное переплетение и единение технологий проводных и беспроводных, аналоговых и цифровых.

Огромную роль в области утверждения международных стандартов играет Международная организация по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Это сеть институтов стандартизации 148 различных стран. Само название организации ISO — не сокращение (было бы IOS), а производное от греческого слова *isos* (равный). Если ITU, как агентство ООН, представляет собой межправительственную организацию, то ISO — неправительственный орган. Среди членов ISO не только правительственные, но и частные организации. Прародителем ISO стала основанная в 1906 г. и успешно действующая до сих пор Международная электротехническая комиссия (МЭК, IEC — International Electrotechnical Commission), занимающаяся вопросами стандартизации в области электротехники и электроники. В 1926 г. была создана ISA (International Federation National Standardizing Associations) — Международная федерация национальных стандартизирующих организаций. С началом Второй мировой войны ISA прекратила существование, но была возрождена под названием ISO на конференции национальных стандартизирующих организаций (25 стран), проходившей с 14 по 26 октября в 1946 г. в Лондоне (официальное начало работы ISO — 23 февраля 1947 г.). Важную роль в рождении ISO сыграл созданный в 1944 г. Координационный комитет стандартов Объединенных Наций (United Nations Standards Coordinating Committee), влившийся в ISO. Сегодня ISO играет важнейшую роль в области стандартизации в телекоммуникациях, работая в плотной кооперации с IEC. Можно сказать, что IEC и ISO поделили сферы влияния: IEC — стандарты в области электроники и электротехники, ISO — все остальное. Они используют единую систему нумерации, и в кодах стандартов зачастую фигурирует название обеих организаций, например ISO/IEC 8802-3.

Отметим, что и ITU, и ISO, и IEC выступают скорее как самые авторитетные утверждающие организации. Сегодня общемировая практика такова, что собственно технической проработкой будущих стандартов занимаются ведущие национальные и межнациональные организации. Прежде всего, это Европейский институт стандартизации в области телекоммуникаций ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Европейская конференция почтовых и телекоммуникационных ведомств (CEPT — Conference of European Postal and Telecommunication Administrations), национальные институты стандартизации. В США это ANSI, в Японии — JESA (Japanese Engineering Standards Association), в Великобритании — Министерство почт и телекоммуникаций (MPT — Ministry of Posts and Telecommunications). Весьма значимы разногласия промышленные ассоциации и объединения, такие, как Ассоциация электронной промышленности США EIA (Electronics Industries Association) и Институт инженеров по электротехнике и электронике IEEE (США). Очевидно, что эти организации сами по себе никаких технологий не разрабатывают, но они организуют и координируют всю работу, необходимую для выбора оптимального варианта из нескольких предложенных, его доработки, документального оформления, утверждения, разрешения конфликтов и т. п. Как правило, для каждого будущего стандарта создается рабочая группа, в которую входят представители всех заинтересованных сторон, которая и занимается проработкой вопроса.

Особняком в перечне стандартизирующих организаций стоит Институт инженеров по электротехнике и электронике — IEEE (Institute of Electrical and

Electronics Engineers). Достаточно сказать, что членами IEEE являются ANSI и ISO. IEEE выпускает свои собственные стандарты, имеющие общемировое значение. Как правило, они затем утверждаются ISO и/или ITU, но это уже формальность.

Безусловно, IEEE — явление американское. Но сама история этой организации показывает, насколько важную роль она играла и играет в развитии телекоммуникаций в мировом масштабе, насколько ее структура отражает реалии этой столь динамичной индустрии. Корни IEEE уходят в позапрошлый век. 13 мая 1884 г. по инициативе 25 наиболее авторитетных специалистов-электротехников США, среди которых были Т. Эдисон, Э. Томсон и Э. Хьюстон, был учрежден Американский институт инженеров-электротехников AIEE (American Institute of Electrical Engineers). В области телекоммуникаций эта организация занималась вопросами проводной электросвязи. Именно AIEE принадлежит заслуга в создании первых стандартов США в данном направлении. В 1907 г. в Бостоне было организовано Общество инженеров по беспроводной телеграфии (Society of Wireless Telegraph Engineers — SWTE). Через два года в Нью-Йорке создали Беспроводной институт (The Wireless Institute — TWI). Однако к 1912 г. обе эти организации оказались в кризисе и решили объединиться. В результате был создан Институт радиоинженеров IRE (Institute of Radio Engineers). Эта организация, ведающая вопросами стандартизации в беспроводной связи, в 1963 г. объединилась с AIEE. Так 1 января 1963 г. родился IEEE. Отметим, что, несмотря на международный статус, IEEE тяготеет к Северо-Американскому континенту. Однако это не мешает ему быть законодателем мировой моды в области телекоммуникаций. В рамках темы настоящей книги особого внимания заслуживает комитет IEEE 802, занимающийся вопросами стандартизации технологий сетей передачи данных. Усилиями этого комитета оформлены в виде стандартов такие технологии, как Ethernet, Token Ring, беспроводной Ethernet и др.

В России вопросами стандартизации в качестве головного национального института занимался и продолжает заниматься Госстандарт (в сотрудничестве с отраслевыми институтами — ЦНИИС, ЛОНИИС и др.). К сожалению, работа Госстандарта в области телекоммуникаций в плане участия в международной стандартизационной деятельности не отличается оперативностью. Возможно, в этом есть и положительная сторона, поскольку сегодня отечественные специалисты оперируют международными стандартами — ISO, ITU, IEEE. Это гарантирует, что не появится очередной стандарт, либо не согласующийся с общемировой практикой (как до сих пор действующий в области телефонии ГОСТ 7153-85 с уникальным требованием на сопротивление наборного ключа телефонного аппарата при замыкании шлейфа менее 50 Ом), либо с явно не лучшими техническими решениями (вспомним частотную систему сигнализации «2 из 6» с равномерным шагом между частотами 200 Гц в диапазоне 700–1700 Гц, что требует существенно разнополосных фильтров). Но по мере интеграции с мировым телекоммуникационным сообществом ситуация, надеемся, будет меняться к лучшему.

## 1.4. Модель взаимодействия открытых систем

Эталонная модель взаимодействия открытых систем (МВОС, OSI — open system interconnection) — это наиболее удачная попытка стандартизировать протоколы

обмена информацией. Она была разработана и утверждена ISO в тесном взаимодействии с ССИТТ в 1984 г. МВОС не только стала основой для разработки сетевых стандартов, но и явилась хорошей методологической основой для изучения и сравнения сетевых технологий. Несмотря на то что были разработаны и другие модели, большинство разработчиков и поставщиков сетевых продуктов используют терминологию эталонной модели МВОС.

В соответствии с МВОС все протоколы взаимодействия систем подразделяются на семь уровней — физический, канальный (звена данных), сетевой, транспортный, сеансовый, представительский и прикладной. Рассмотрим кратко основные функции перечисленных уровней.

Нижним уровнем иерархии является физический (Physical). Он определяет электрические и механические характеристики подключения к физическим каналам связи, а также процедуры передачи потока битов от одного узла к другому. Иными словами, функции этого уровня — передать поток битов между двумя точками по заданному каналу связи.

*Физический уровень* предоставляет сервис для канального уровня или уровня звена данных (Data link), отвечающего за передачу данных по каналу связи между двумя точками (узлами сети). К функциям канального уровня в первую очередь относятся упаковка информации в кадры определенной длины, формирование контрольных сумм и проверка содержимого кадров после их передачи, формирование подтверждений о приеме кадров, повторная передача неподтвержденных кадров и т. д.

*Сетевой уровень* (Network) обеспечивает взаимодействие между узлом и сетью. Он формирует сетевые адреса пакетов, управляет потоками, адресацией, маршрутизацией, организацией и поддержанием транспортных соединений. Единицей информации протоколов сетевого уровня является пакет, поэтому иногда этот уровень называют пакетным.

*Транспортный уровень* (Transport) предназначен для трансляции потоков данных из одного порта в другой. Под портом понимается конец логического канала сети передачи данных, где фактически завершаются операции транспортировки данных и начинаются вычислительные процессы. На этом уровне происходит прозрачная трансляция данных от передатчика к приемнику через сколь угодно сложную среду передачи — через различные сети посредством разнообразных сетевых и физических технологий. На транспортном уровне устанавливаются и разъединяются транспортные соединения, формируются пакеты, принадлежащие передаваемому в сеансе связи потоку. Транспортный уровень — последний в иерархии МВОС, обеспечивающий транспортный сервис; он освобождает более высокие уровни от организации передачи данных.

*Сеансовый уровень* (Session) служит для организации, поддержания и окончания сеансов (логической связи) между прикладными процессами. Сеансы устанавливаются через уровень представления.

*Уровень представления* (Presentation) необходим для преобразования данных в форму, удобную для прикладной программы. На этом уровне преобразуются форматы данных и команд.

*Прикладной уровень* (Application) представляет собой процесс обработки информации (прикладные процессы). Он обеспечивает работу прикладной программы так, как если бы обмен данными происходил бы не через сеть передачи данных, а автономно в вычислительной машине.

Отметим, что, несмотря на несомненную полезность МВОС, не существует ни одной коммуникационной системы, структурированной в соответствии со всеми семью уровнями этой модели. И если между физическим и канальным уровнем еще можно провести достаточно четкую границу, то последний уже распадается на два подуровня — контроля доступа к среде передачи (MAC — Medium Access Control) и управления логическим соединением (LLC — Logical Link Control). Однако МВОС внесла определенный порядок в описание процедур взаимодействия телекоммуникационных систем, и хотя бы в этом она сослужила добрую службу.

## 1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях

Одна из основных проблем построения беспроводных систем — это решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Существует несколько базовых методов множественного доступа (их еще называют методами уплотнения или мультиплексирования), основанных на разделении между станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код. Задача множественного доступа — выделить каждому каналу связи пространство, время, частоту и/или код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

*Множественный доступ с пространственным разделением* (Space или Spatial Division Multiplexing — SDM) основан на разделении сигналов в пространстве, когда каждое беспроводное устройство может вести передачу данных только в границах одной определенной территории (пространственной области), на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Самый простой способ пространственного разделения — это ограничение мощности передатчиков.

Еще недавно данный метод считался малоэффективным — до тех пор, пока не получили промышленное развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон действия отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе антенн с перестраиваемой диаграммой направленности, данный метод получил широкое распространение. Характерный пример — системы сотовой телефонной связи, системы с цифровым формированием диаграмм направленности и др.

В схемах множественного доступа с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing — FDM) каждое устройство работает на строго определенной частоте, благодаря чему несколько устройств могут вести передачу данных на одной территории. Это один из наиболее известных методов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерный пример схемы FDM — работа нескольких радиостанций на одной территории, но на разных частотах. При этом их рабочие частоты должны быть разделены защитным частотным интервалом, позволяющим исключить взаимные помехи. Эта схема, хотя и позволяет использовать множество устройств на определенной территории, сама по себе приводит к неоправданному расточительству обычно

скучных частотных ресурсов, поскольку требует выделения отдельной частоты для каждого беспроводного устройства.

Более гибким является *множественный доступ с временным разделением* (Time Division Multiplexing — TDM). В данной схеме каналы распределяются по времени, т. е. каждый передатчик транслирует сигнал на одной и той же частоте, но в различные промежутки времени (как правило, циклически повторяющиеся) при строгой синхронизации процесса передачи.

Подобная схема достаточно удобна, так как временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Устройствам с большим трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Однако метод временного уплотнения не может использоваться в чисто аналоговых сетях — даже если исходные данные аналоговые (например, речь), он требует их оцифровки и разбиения на пакеты. Скорость передачи отдельного пакета, как правило, существенно превосходит скорость передачи исходных оцифрованных данных. Характерный пример применения временного уплотнения (в проводных сетях) — это метод передачи телефонного трафика посредством каналов Е1. На узловой АТС каждый аналоговый телефонный канал преобразуется в поток данных со скоростью 64 кбит/с (8 разрядов оцифровки  $\times$  8 кГц частоты выборок). Фрагменты по 8 бит из 32 каналов (30 телефонных и 2 служебных) образуют цикл. Длительность каждого цикла — 125 мкс, соответственно скорость передачи данных —  $(32 \times 8 \text{ бит})/125 \text{ мкс} = 2048 \text{ кбит}/\text{с}$  (т. е. 2048 000 бит/с). Данный поток транслируется по магистральным каналам и восстанавливается (демультиплексируется) на приемном конце.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех, случайных или преднамеренных. Однако успешный опыт эксплуатации таких знаменитых TDM-систем, как сотовые телефонные сети стандарта GSM, свидетельствует о достаточной надежности механизма временного уплотнения.

Еще один тип множественного доступа — это мультиплексирование с *кодовым разделением* (Code Division Multiplexing — CDM). Первоначально, из-за сложности реализации, данная схема использовалась в военных целях, но со временем прочно заняла свое место в гражданских системах. Именем основанного на CDM механизма разделения каналов (CDMA — CDM Access) даже назван стандарт сотовой телефонной связи IS-95a, а также ряд стандартов третьего поколения сотовых систем связи (cdma2000, W-CDMA и др.). В данной схеме все передатчики передают сигналы на одной и той же частоте, но с разными базовыми кодами.

Принцип кодового уплотнения иллюстрирует ситуация, когда много людей в одной комнате разговаривают на разных языках. При этом каждый человек понимает только один определенный язык. Для каждого речь на непонятном языке будет восприниматься как ничего не значащий шум, лишенный полезной информации. А на фоне этого шума он будет воспринимать поток информации на понятном ему языке.

В схеме CDM каждый передатчик заменяет каждый бит исходного потока данных на CDM-символ — кодовую последовательность длиной в 11, 16, 32, 64 и т. п. бит (их называют чипами). Кодовая последовательность уникальна для

каждого передатчика, причем их подбирают так, чтобы корреляция двух любых CDM-кодов была минимальна (а в ряде случаев — чтобы автокорреляция CDM-кода при фазовом сдвиге была также минимальна). Как правило, если для замены 1 в исходном потоке данных используют некий CDM-код, то для замены 0 применяют тот же код, но инвертированный.

Приемник знает CDM-код передатчика, сигналы которого должен воспринимать. Он постоянно принимает все сигналы, оцифровывает их. Затем в специальном устройстве (корреляторе) производит операцию свертки (умножения с накоплением) входного оцифрованного сигнала с известным ему CDM-кодом и его инверсией. В несколько упрощенном виде это выглядит как операция скалярного произведения вектора входного сигнала и вектора с CDM-кодом. Если сигнал на выходе коррелятора превышает некий установленный пороговый уровень, приемник считает, что принял 1 или 0. Для увеличения вероятности приема передатчик может повторять посылку каждого бита несколько раз. При этом сигналы других передатчиков с другими CDM-кодами приемник воспринимает как аддитивный шум. Более того, благодаря большой избыточности (каждый бит заменяется десятками чипов) мощность принимаемого сигнала может быть сопоставима с интегральной мощностью шума. Похожести CDM-сигналов на случайный (гауссов) шум добиваются, используя CDM-коды, порожденные генератором псевдослучайных последовательностей. Такие кодовые последовательности называют шумоподобными, соответственно модулированные ими сигналы — шумоподобными сигналами (ШПС). Очевидно, что при передаче посредством ШПС спектр исходного сообщения расширяется во много раз. Поэтому данный метод еще называют расширением спектра сигнала посредством прямой последовательности (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum).

Наиболее сильная сторона данного уплотнения заключается в повышенной защищенности и скрытности передачи данных: не зная кода, невозможно получить сигнал, а в ряде случаев — и обнаружить его присутствие. Кроме того, кодовое пространство несравненно более значительно по сравнению с частотной схемой уплотнения, что позволяет без особых проблем присваивать каждому передатчику свой индивидуальный код. Основной же проблемой кодового уплотнения до недавнего времени являлась сложность технической реализации приемников и необходимость обеспечения точной синхронизации передатчика и приемника для гарантированного получения пакета.

Отметим, что уплотнение с кодовым разделением — метод синтетический, т.е. он базируется на частотном либо временном методе уплотнения. В наиболее «чистом» виде метод кодового уплотнения реализуется в случае DSSS. Кроме того, известны и используются методы расширения спектра посредством частотных и временных скачков (соответственно FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum и THSS — Time Hopping Spread Spectrum). В случае расширения спектра посредством частотных скачков (еще его называют методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты — ППРИ) в заданном частотном диапазоне  $F$  одновременно работает несколько передатчиков, каждый в узкой полосе, во много раз меньшей  $F$ . Центральная частота каждого передатчика в ходе работы дискретно изменяется по закону, задаваемому уникальной для него кодовой последовательностью. Приемник знает эту кодовую последовательность и перестраивается по частоте приема синхронно с передатчиком. Кодовые последовательности выбирают так, чтобы минимизировать вероятность одно-

временной работы двух передатчиков. Тем самым обеспечивается определенная защита от прослушивания и помех. Данный метод в ряде случаев оказывается достаточно эффективным и применяется, в частности, в такой популярной сегодня технологии БСПИ, как Bluetooth.

Если метод частотных скачков представляет собой метод частотного уплотнения с изменением частотной полосы, то метод временных скачков аналогичен временному уплотнению, только моменты начала трансляции пакетов передатчика не строго периодичны, а изменяются по псевдослучайному закону. Как правило, кодовая последовательность определяет время отклонения начала трансляции очередного пакета от заданного периода. Подобный механизм, в частности, реализован в системах связи со сверхширокой спектральной полосой компании Time Domain.

Еще одна важная производная методов кодового и частотного уплотнения — механизм мультиплексирования посредством ортогональных несущих (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Его суть: весь доступный частотный диапазон разбивается на достаточно много поднесущих (от нескольких сот до тысяч). Одному каналу связи (приемнику и передатчику) назначают для передачи несколько таких несущих, выбранных из всего множества по определенному закону. Передача ведется одновременно по всем поднесущим, т. е. в каждом передатчике исходящий поток данных разбивается на  $N$  субпотоков, где  $N$  — число поднесущих, назначенных данному передатчику. Распределение поднесущих в ходе работы может динамически изменяться, что делает данный механизм не менее гибким, чем метод временного уплотнения.

До недавнего времени распространение технологии OFDM сдерживала сложность ее аппаратной реализации. Однако с развитием полупроводниковой технологии это уже не является преградой. В результате метод OFDM приобретает все большее распространение, в частности, используется в системах связи таких популярных стандартов, как IEEE 802.11 и DVB, является одним из основных механизмов стандарта широкополосных региональных БСПИ IEEE 802.16-2004. Более того, все наиболее перспективные стандарты БСПИ (IEEE 802.16e, LTE, cdma200 Rev.C) основаны именно на технологии OFDM. И в сетях 4G будет использоваться этот метод множественного доступа.

Как правило, описанные схемы в беспроводных сетях используются в сочетании друг с другом. Например, для мобильных сетей GSM одновременно используются схемы уплотнения SDM, TDM и FDM, в системах стандарта IEEE 802.16 эффективно сочетаются технологии OFDM, CDM, FDM/TDM и SDM.

Рассмотренные выше механизмы — это способы разделения единого ресурса на каналы передачи. Однако эти каналы надо еще назначить конкретным устройствам. Рассмотрим несколько наиболее популярных схем распределения канальных ресурсов на базе технологии TDM (аналогичные механизмы возможны и при других методах уплотнения).

Простейший алгоритм для схемы уплотнения TDM — это *фиксированное распределение временных интервалов* между различными устройствами. Распределением занимается базовая станция (центральное устройство), которая сообщает каждому абонентскому устройству время начала передачи. Подобная схема идеально подходит для беспроводных сетей, которые имеют фиксированную пропускную способность. Однако она не оптимальна в случае нерегулярной

передачи, поскольку во время молчания устройства его интервал не может быть использован другим терминалом. Поэтому число абонентских станций (либо допустимая скорость передачи) принципиально и существенно ограничено.

Противоположностью данной схемы является механизм полностью случайного доступа или *классическая схема Aloha*. В ней отсутствует какой-либо алгоритм, который позволял бы избежать коллизий (одновременной работы двух передатчиков в одно время на одной частоте). Это означает, что любое устройство может передавать данные в любое время и нет никакой гарантии, что эти данные будут успешно доставлены получателю. Данная схема — один из самых первых механизмов доступа для систем беспроводной связи. Она была разработана в 1970-х годах в Гавайском университете и применялась в сети ALOHANET для беспроводного соединения нескольких станций (университетских зданий, располагавшихся на разных островах Гавайского архипелага). Данная схема хорошо работает в сетях со слабой загрузкой, т. е. в сетях, имеющих малое число устройств или передающих небольшое количество информации в единицу времени. При пуассоновском распределении интенсивности генерации пакетов устройствами максимальная пропускная способность системы достигается уже при 18%-ной загрузке.

Усовершенствованием основной схемы Aloha явился *метод множественного доступа с детектированием несущей* (Carrier Sense Multiple Access — CSMA). Детектирование несущей частоты означает лишь то, что канал прослушивается устройством. Если он занят, т. е. другое устройство передает данные, то передатчик переходит в ждущий режим до того момента, когда канал станет свободным. Этот метод позволяет значительно улучшить пропускную способность системы. Как и в методе случайного доступа, в данной схеме не требуется наличия центрального устройства, т. е. каждое устройство принимает решение о передаче самостоятельно. Поскольку фактически доступ к среде получает та станция, которая первой начала передачу, данный механизм еще называют методом конкурентного доступа.

Существует несколько версий схемы CSMA. При использовании неустойчивой схемы CSMA станции слушают канал и, если канал свободен, немедленно начинают передачу. Если канал занят, станция перед повторным определением состояния канала выжидает случайный промежуток времени, после чего опять слушает канал. Если канал свободен, то терминал передает данные. В  $p$ -настойчивых схемах CSMA узлы тоже определяют состояние канала, но данные передаются с вероятностью  $p$ . Устройство может отложить передачу до следующего временного интервала с вероятностью  $1-p$ , т. е. осуществляется дополнительное разделение доступа к среде. В  $l$ -настойчивых системах CSMA все станции, которым необходимо передавать данные, одновременно получают доступ к среде, как только она освобождается.

Другой вариацией данного метода является CSMA/CA (CA — Collision Avoidance, с предотвращением конфликтов), использующаяся в беспроводных ЛВС стандарта IEEE 802.11. Здесь после определения незанятости канала время ожидания выбирается случайно в некотором временном промежутке. В спецификации HIPERLAN 1 описана схожая схема — бесприоритетный множественный доступ с исключением (Elimination Yield — Non-Preemptive Multiple Access, EY — NPMA).

*Схема с цифровым детектированием* (DSMA — Digital Sense Multiple Access) использует схожий с CSMA/CA принцип работы. Этот метод также называют множественным доступом с детектированием подавления (Inhibit Sense Multiple Access — ISMA). Различие заключается в том, что занятость канала определяется не путем прослушивания, а посредством посылки базовой станцией пакета, в котором определяется статус канала. В данной схеме базовая станция должна быть синхронизирована с передатчиками так, чтобы передатчики не передавали данные во время передачи статуса канала. Если канал занят, то станции ждут случайного промежутка времени для последующей передачи. Поскольку несколько станций могут одновременно передать данные, центральная станция посыпает пакет с подтверждением о получении пакета данных.

В современных БСПИ, как правило, используют сочетание механизмов централизованного назначения временных интервалов и методов конкурентного доступа. По сути, работа этих систем происходит в два этапа. Первый этап — резервирование ресурсов (временных интервалов) для будущей передачи. На этом этапе все станции заявляют (пытаются заявить) о своих потребностях в канальных ресурсах. На втором этапе происходит непосредственная передача данных в отведенном временном интервале. В этих схемах используется центральный терминал, с помощью которого производится синхронизация передач и осуществляется резервирование. Как правило, механизмы резервирования приводят к увеличению времени задержки получения пакетов при слабой загрузке системы, но при этом обеспечивают ей более высокую пропускную способность.

Примером подобного механизма является *схема множественного доступа с распределением по запросу* (Demand Assigned Multiple Access — DAMA), называемая также схемой Aloha с резервированием. Она, в частности, применяется в спутниковых системах связи. В течение определенного временного интервала, разбитого на мини-интервалы, все станции пытаются зарезервировать для себя будущие временные интервалы для передачи данных. Поскольку на стадии резервирования происходят конфликты, некоторым станциям не удается зарезервировать канальный ресурс. Если станции удалось зарезервировать временной интервал, то ни одна другая станция не сможет в это время осуществлять передачу. Таким образом, базовая станция собирает все успешные запросы (остальные игнорируются) и посыпает назад список с указанием прав доступа к последующим временным интервалам. Этому списку подчиняются все станции. Схема DAMA относится к схемам с явным резервированием, когда каждый интервал для передачи резервируется явно.

*Схема TDMA с резервированием* отличается от предыдущей схемы тем, что этап резервирования происходит не на основании конкурентного доступа, а по обычной фиксированной схеме TDMA. Каждому устройству назначается временной мини-интервал, в течение которого оно сообщает, будет ли передавать данные. Поэтому в начале каждого цикла передачи базовая станция передает пакет, разбитый на  $N$  интервалов, в каждом из которых указано, зарезервирован канал или нет. Затем следуют  $N \cdot k$  интервалов для данных. Данный метод гарантирует каждой зарезервированной канал станции определенную пропускную способность. Остальные станции могут пересыпать данные в течение интервалов, которые никто не зарезервировал, но уже на принципах конкурентного доступа и без гарантии доставки пакетов.

*Схема с резервированием пакетов* (PRMA — Packet Reservation Multiple Access) является примером со скрытым резервированием, поскольку интервалы резервируются неявно. Центральное устройство в начале каждого цикла рассыпает список с распределением временных интервалов. Само же резервирование происходит по другой схеме. Представим, что какому-либо устройству необходимо передать данные, но при этом оно не зарезервировало временной интервал. Это устройство регулярно получает список с зарезервированными интервалами. К примеру, в полученном списке указано, что третий, пятый и восьмой интервалы не зарезервированы, т.е. свободны. Устройство случайным образом принимает решение о том, в каком интервале можно попытаться передавать данные. Например, устройство передает сообщение в пятый интервал. Если передача прошла успешно, устройство получает об этом подтверждение. Базовая станция резервирует этот канал для нового устройства и включает его в свой список. Если запрос не дошел до базовой станции, устройство должно попробовать вновь послать данные в один из свободных интервалов.

## Литература

1. Вишневский В. М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета. — Электросвязь, 2000, № 10, с. 9–13.
2. Saunders S., Heywood P., Dornan A., Bruno L., Allen L. Wireless IP: Ready or Not, Here it Comes. — Data Communications, 1999, № 9, p. 42–68.
3. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. — М.: Техносфера, 2004.
4. Wideband wireless digital communications/ Ed. Andreas F. Molisch. — Prentice Hall PTR, 2001.
5. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети/ Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003.

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ WiMAX ПУТЬ К 4G

В.Вишневский  
С.Портной  
И.Шахнович





М В И Я З Р И

В. Вишневский  
С. Портной  
И. Шахнович

Энциклопедия  
WiMAX  
Путь к 4G

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2009

**Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.**

**Энциклопедия WiMAX**

**Путь к 4G**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. — 472 с. ISBN 978-5-94836-223-6**

Книга написана известными специалистами в области беспроводных технологий. Издается при содействии и под эгидой WiMAX Forum.

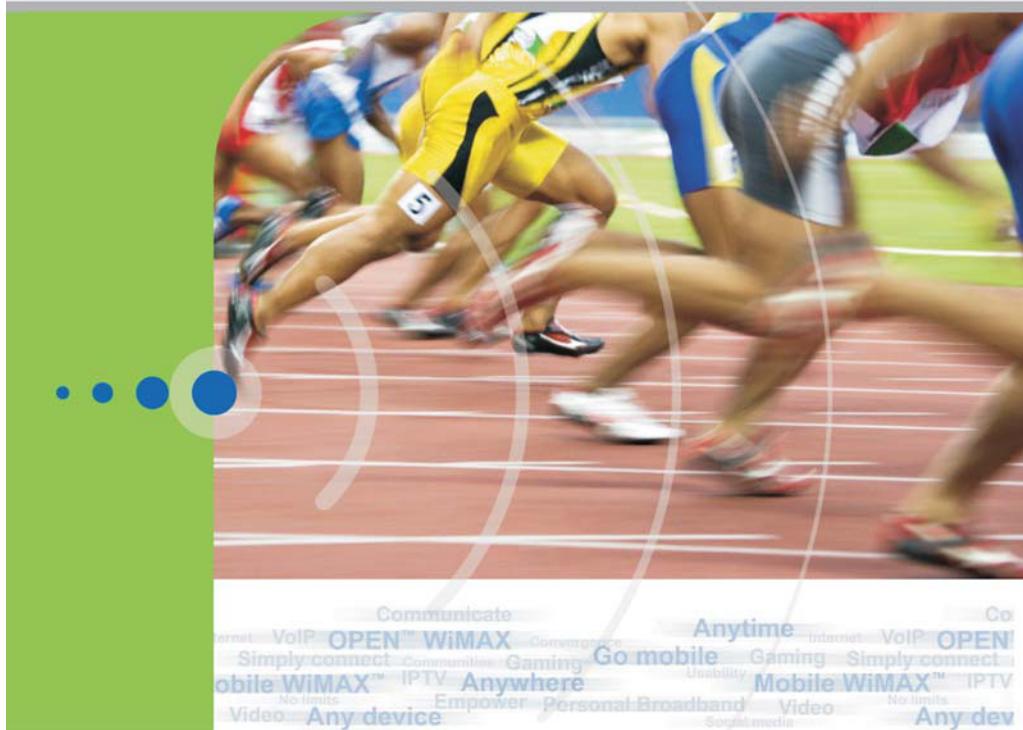
В монографии описаны принципы построения, логическая и физическая структура беспроводных сетей передачи данных городского/регионального масштаба. Рассказано о беспроводных сетях IEEE 802.11, включая mesh-сети. Описана архитектура и принципы организации WiMAX-сетей (впервые в отечественной литературе). Детально изложена технология радиодоступа IEEE 802.16, включая мобильные сети (IEEE 802.16e). Описаны сотовые сети стандартов 3G и LTE (также впервые в отечественной литературе), а также технологии широкополосного цифрового телевидения и радиовещания (DVB и DAB). Изложены принципы технологии MIMO. Приведены примеры реализации региональных WiMAX-сетей. Изложены теоретические основы передачи информации (теоремы Шеннона, Котельникова, Найквиста), методы кодирования и модуляции в беспроводных сетях.

В целом монография представляет собой уникальное справочное пособие по основным на сегодня технологиям широкополосного беспроводного доступа, охватывающего вопросы от архитектуры сетей до аппаратной реализации устройств и принципов сертификации оборудования. Сочетание как минимум необходимых теоретических основ беспроводных телекоммуникаций, так и описания конкретных стандартов, схемотехнических принципов построения поддерживающих их устройств и примеров реализации конкретных беспроводных сетей делает книгу полезной широкому кругу читателей, прежде всего — специалистам, занимающимся вопросами построения широкополосных беспроводных сетей, разработчикам телекоммуникационного оборудования, руководителям IT-отделов и аналогичных служб.

© 2009, Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В.

© 2009, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-223-6**



## 4Motion Delivers Mobile WiMAX™

- Полностью IP решение Мобильного WiMAX для мобильных и фиксированных развертываний
- Продвинутая технология, объединенная с различными опциями вендора
- Сертифицированное WiMAX-Форумом решение, соответствующее стандарту 802.16e-2005
- Интегрированная SentieM™ технология
- Развёрнутое во всем мире решение на системе базовых станций WiMAX
- Персональный широкополосный доступ в любом месте, в любое время



# Содержание

<b>Обращение к читателям .....</b>	14
<b>Введение .....</b>	19
<b>Глава 1</b>	
<b>Беспроводные сети передачи информации.</b>	
<b>История и основные понятия .....</b>	22
1.1. Исторический очерк развития сетевых технологий .....	22
1.2. Классификация и технологии беспроводных сетей .....	29
1.3. Стандартизация в области телекоммуникаций .....	32
1.4. Модель взаимодействия открытых систем .....	35
1.5. Методы доступа к среде передачи в беспроводных сетях.....	37
Литература .....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Коды и их применение в системах передачи информации....</b>	44
2.1. Математические основы передачи информации.....	44
2.2. Коды, устраниющие избыточность .....	48
2.2.1. Введение в теорию кодирования.....	48
2.2.2. Теорема Шеннона для дискретного источника .....	49
2.2.3. Применение кодов, устраниющих избыточность .....	51
2.3. Общее понятие о шифровании информации .....	57
2.4. Корректирующие коды .....	59
2.4.1. Блок-схема системы связи и примеры простейших кодов .....	59
2.4.2. Теорема Шеннона для канала с шумами .....	62
2.4.3. Введение в теорию групп, колец и полей.....	63
2.4.4. Введение в пространства Хемминга.....	69
2.4.5. Линейные коды.....	71
2.4.6. Циклические коды.....	75
2.4.7. Наиболее известные классы блоковых кодов.....	77
2.4.8. Итеративные и каскадные коды.....	79
2.4.9. Мягкое декодирование, энергетический выигрыш кодирования — основные определения .....	81
2.4.10. Низкоплотностные коды.....	83
2.4.11. Сверточные коды.....	89
2.4.12. Турбокоды .....	93
2.4.13. Обобщенные каскадные коды .....	97
2.5. Примеры реализации корректирующих кодов в различных стандар- тах (по материалам стандартов и сайта <a href="http://www.turbobest.com">www.turbobest.com</a> ).....	99
2.5.1. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.3an .....	99
2.5.2. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.11n .....	100
2.5.3. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в стан- дарте IEEE 802.16 .....	100



2.5.4. Схема корректирующего кодирования и декодирования в стандарте IEEE 802.16 .....	101
2.5.5. Схемы корректирующего кодирования и декодирования в 3GPP LTE.....	101
Литература .....	104
<b>Глава 3</b>	
<b>Системы модуляции и сигнально-кодовые конструкции .....</b>	<b>105</b>
3.1. Модуляция как перенос сигнала по спектру .....	105
3.2. Дискретная модуляция.....	106
3.3. Сигнально-кодовые конструкции (СКК) в гауссовом канале .....	107
3.4. Описание блоковых СКК в гауссовом канале .....	110
3.5. Описание сверточных СКК в гауссовом канале .....	111
3.6. Модель канала с межсимвольной интерференцией (МСИ) .....	112
3.7. Преобразование канала с МСИ в параллельные каналы без памяти....	115
3.8. Пропускная способность канала с МСИ.....	119
3.9. Построение СКК для канала с МСИ и переменными параметрами (OFDM) .....	120
Литература .....	123
<b>Глава 4</b>	
<b>Стандарты цифрового видео- и радиовещания.....</b>	<b>124</b>
4.1. Цифровое ТВ-вещание .....	124
4.1.1. Стандарт ATSC .....	126
4.1.2. Стандарт DVB .....	128
4.2. Цифровое радиовещание .....	143
4.2.1. Система Eureka-147 .....	143
4.2.2. Технология IBOC .....	151
4.2.3. Всемирное цифровое радио (DRM) .....	154
Литература .....	156
<b>Глава 5</b>	
<b>Беспроводные локальные сети стандартов IEEE 802.11 .....</b>	<b>157</b>
5.1. Локальные сети под управлением IEEE 802.11.....	157
5.2. Основные принципы IEEE 802.11.....	160
5.3. MAC-уровень стандарта IEEE 802.11.....	162
5.4. Физический уровень стандарта IEEE 802.11b .....	165
5.5. Аппаратная реализация сетей IEEE 802.11b .....	170
5.6. Стандарт IEEE 802.11a .....	173
5.6.1. Формирование OFDM-символов .....	173
5.6.2. Структура пакетов физического уровня.....	176
5.7. Стандарт IEEE 802.11g .....	179
5.8. Аппаратная поддержка IEEE 802.11g.....	184
5.9. Проект стандарта IEEE 802.11n.....	185
5.10. Отличия физического уровня.....	187
5.10.1. Каналы и режимы передачи .....	187
5.10.2. Формирование сигналов MIMO-OFDM .....	188



5.10.3.	Структура кадров физического уровня .....	191
5.10.4.	Особенности MAC-уровня .....	193
5.10.5.	Элементная база для 802.11n .....	197
5.11.	Широкополосные беспроводные mesh-сети стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.1.	Проект стандарта IEEE 802.11s .....	200
5.11.2.	Механизм доступа к среде с использованием MDA-резервирования .....	202
5.11.3.	Синхронизация и биконы в IEEE 802.11s .....	203
5.11.4.	Энергосбережение в IEEE 802.11s .....	205
5.11.5.	Маршрутизация в широкополосных беспроводных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11s.....	206
5.11.6.	Реализация mesh-сетей на базе стандарта IEEE 802.11.s .....	212
5.12.	Анализ информационной безопасности беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11 .....	214
5.12.1.	Методы защиты информации в спецификации IEEE 802.11 и их уязвимости.....	214
5.12.2.	Архитектура стандарта IEEE 802.11i.....	219
5.12.3.	Обеспечение конфиденциальности и целостности данных с использованием VPN .....	228
	Литература .....	236

## Глава 6

	Мобильные сотовые технологии .....	239
6.1.	Аналоговые стандарты сотовой связи .....	241
6.2.	Глобальная система мобильной связи GSM.....	242
6.3.	Стандарт CDMA (cdmaOne).....	244
6.4.	Третье поколение сотовой связи .....	249
6.4.1.	Основные технологии третьего поколения .....	249
6.5.	Технология UMTS/HSPA.....	249
6.5.1.	История и перспективы развития .....	249
6.5.2.	Архитектура сети UMTS/HSPA .....	251
6.5.3.	Радиоинтерфейс UMTS/HSPA .....	254
6.5.4.	Физический уровень радиоинтерфейса UMTS/HSPA .....	255
6.6.	Технология TD-SCDMA .....	258
6.7.	Технология cdma2000 .....	259
6.7.1.	История и перспективы развития .....	259
6.7.2.	Архитектура сети cdma2000 .....	262
6.8.	Технология и архитектура сетей LTE.....	263
6.8.1.	Развитие технологии LTE .....	264
6.8.2.	Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	265
6.8.3.	Нисходящий канал.....	269
6.8.4.	Восходящий канал.....	271
6.8.5.	Информационные потоки .....	274
6.8.6.	Многоантенные системы .....	275
6.8.7.	Механизм диспетчеризации и повторные передачи .....	276
6.8.8.	Сетевая архитектура SAE .....	277
6.8.9.	Дальнейшие пути развития LTE .....	279
	Литература .....	280

**Глава 7****Стандарт широкополосного доступа****IEEE 802.16 ..... 282**

7.1.	Предыстория стандарта IEEE 802.16 .....	282
7.1.1.	Системы MMDS и LMDS/MVDS .....	282
7.1.2.	Появление стандарта широкополосного доступа IEEE 802.16-2004 .....	284
7.2.	Общие принципы IEEE 802.16-2004 .....	285
7.3.	MAC-уровень стандарта IEEE 802.16.....	287
7.3.1.	Структура MAC-уровня.....	287
7.3.2.	Соединения и сервисные потоки.....	288
7.3.3.	Пакеты MAC-уровня .....	289
7.3.4.	Общая структура кадров IEEE 802.16 .....	290
7.3.5.	Принцип предоставления канальных ресурсов.....	291
7.3.6.	Подтверждение приема (ARQ) и быстрая обратная связь .....	293
7.4.	Физический уровень стандарта IEEE 802.16. Режим WirelessMAN-SC .....	294
7.4.1.	Канальное кодирование.....	294
7.4.2.	Структура кадров.....	296
7.5.	Режим WirelessMAN-OFDM.....	299
7.5.1.	Канальное кодирование.....	301
7.5.2.	Структура кадров .....	304
7.5.3.	Особенности запроса канальных ресурсов .....	305
7.5.4.	Mesh-сеть.....	306
7.6.	Режим OFDMA.....	309
7.6.1.	Особенности формирования символов и канального кодирования .....	309
7.6.2.	Структура кадров, методы распределения несущих .....	310
7.6.3.	Нисходящий OFDMA-канал .....	312
7.6.4.	Восходящий канал.....	314
7.6.5.	Запрос полосы и регистрация в сети .....	315
7.7.	Поддержка адаптивных антенных систем.....	316
7.7.1.	Работа с направленными AAS.....	316
7.7.2.	Пространственно-временное кодирование .....	318
7.8.	Интегральная элементная база для устройств стандарта IEEE 802.16 .....	320
7.9.	Широкополосный мобильный доступ под управлением стандарта IEEE 802.16e.....	322
7.9.1.	Особенности MAC-уровня .....	323
7.9.2.	Особенности на физическом уровне .....	332
7.9.3.	Элементная база систем стандарта IEEE 802.16e .....	338
7.10.	Дальнейшее развитие стандарта IEEE 802.16 .....	343
7.10.1.	Проект IEEE 802.16j .....	343
7.10.2.	Проект IEEE 802.16m .....	346
	Литература .....	351

**Глава 8****Архитектура сетей WiMAX .....**

353

8.1.	Основные принципы архитектуры сети WiMAX.....	353
8.2.	Базовая модель сети .....	353



## Содержание

8.3.	Профили ASN .....	357
8.4.	Поддержка мобильности .....	357
8.5.	Управление радиоресурсами .....	362
8.6.	Режим ожидания и пейджинга .....	364
8.7.	Качество обслуживания .....	365
	Литература .....	367
<b>Глава 9</b>		
	<b>Технико-организационные основы WiMAX.....</b>	369
9.1.	История и развитие WiMAX.....	369
9.2.	Сертификация WiMAX .....	372
9.2.1.	Процедура сертификации .....	372
9.2.2.	Сертификационные профили. Динамика сертификации .....	376
9.3.	Оборудование WiMAX на примере платформы BreezeMAX 4Motion.....	388
9.3.1.	ASN-шлюзы.....	389
9.3.2.	Базовая станция.....	389
9.3.3.	Антенные системы .....	397
9.3.4.	Абонентское оборудование .....	398
9.4.	Проблемы радиочастотного ресурса .....	401
9.4.1.	Принципы выделения частотного ресурса в России .....	402
9.4.2.	Выделение частотного ресурса для систем ШБД .....	404
	Литература .....	408
<b>Глава 10</b>		
	<b>Реализованные проекты WiMAX .....</b>	409
10.1.	Развёртывание сетей WiMAX в мире.....	409
10.2.	Развитие сетей WiMAX в России и СНГ .....	422
10.2.1.	Сети фиксированного доступа .....	424
10.2.2.	Сети мобильного доступа.....	429
10.2.3.	Проект компании Lythgoe .....	435
<b>Глава 11</b>		
	<b>Сравнения и выводы.....</b>	437
11.1.	Состояние и прогнозы рынка ШБД .....	437
11.2.	Сравнение WiMAX с HSPA и LTE .....	439
11.3.	Что такое 4G? .....	443
11.4.	Перспективы WiMAX .....	450
	Литература .....	454
<b>Глоссарий .....</b>		
		455



er, it rapidly became apparent that novel networks are absolutely necessary for the broadband access. Not to spend another hundred of years on global network development it is natural to use the mobile radio communication technology.

Thus broadband wireless communication networks became one of the main directions of telecommunication industry development. For the countries with vast territories and low density of population, wireless networks have special significance since they make it possible to develop a large scale telecommunication infrastructure effectively and efficiently.

Even if WiMAX is not the only broadband wireless communication technology, it took in all the best from the borderline technologies like 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB etc. That is why from our point of view it is WiMAX that is the best solution for broadband wireless internet access for people in both developing and developed countries. WiMAX technology enables both mobile and fixed line providers, including absolutely new ones starting from scratch, to progress rapidly. More than 475 WiMAX networks in 140 countries are developed already. There are numerous WiMAX providers in Russia and CIS. Nearly half of a billion people live in the regions where WiMAX providers operate or WiMAX licenses have effect. A year later the amount of people will reach the number of 800 million. International nonprofit association WiMAX Forum includes more than 400 companies — hardware components developers, OEM companies, all kinds of telecoms operators and WiMAX ecosystem.

That is why the book in your hands is so highly important and timely. WiMAX is a bunch of thriving technologies connected to almost all of the telecommunication areas. Most of the technologies from indispensable basics of communication theory to description of specific tech-

так как позволяют экономично и оперативно создавать телекоммуникационную инфраструктуру на обширных территориях.

Технологии WiMAX, хотя и не являются единственными технологиями широкополосной беспроводной связи, впитали в себя все лучшее, что есть в пограничных технологиях 3G, IEEE 802.11, DVB, DAB и др. И поэтому, на наш взгляд, именно они и являются наилучшим решением для обеспечения жителей Земли мобильным широкополосным доступом, как в развивающихся, так и в развитых странах. Технологии WiMAX позволяют быстро прогрессировать как мобильным, так и фиксированным операторам, в том числе — новым операторам, начинаяющим свою деятельность с чистого листа. Сегодня уже развернуто 475 WiMAX сетей в 140 странах. Много операторов в России и в других странах СНГ. Около полумиллиарда человек проживают в зоне действия операторов WiMAX или на территории, где действуют лицензии WiMAX. А через год таких людей будет 800 миллионов. Международная некоммерческая ассоциация WiMAX-форум объединяет более 400 компаний — разработчиков элементной базы, оборудования, операторов связи всех видов, а также «экосистему» WiMAX.

Вот почему книга, которую вы держите в руках, чрезвычайно важна и своевременна. Ведь WiMAX — это пакет бурно развивающихся технологий, связанных практически со всеми сферами телекоммуникаций. Практически все они полностью отражены в данной монографии — от необходимых основ теории передачи информации до описания конкретных технологий, аппаратуры и архитектуры сетей. И в этом отношении работа вполне по праву называется «Энциклопедия WiMAX».

## Введение

Системы беспроводной передачи информации существуют столько же, сколько и сама человеческая цивилизация. Гонцы, стрелы, сигнальные костры, телеграф, искровые передатчики, спутниковые системы связи — все это звенья одной цепи. Изменялись технологии, но суть сетей передачи оставалась неизменной — организовать взаимодействие нескольких различных элементов так, чтобы информация без проводов в заданное время поступала из одной точки в другую. Однако, несмотря на почтенный возраст, беспроводные технологии в последние 15–20 лет развиваются чрезвычайно интенсивно, став одним из основных направлений развития телекоммуникационной индустрии.

Разделение на проводные и беспроводные технологии передачи информации в современном понимании началось в конце XIX века. К этому моменту уже окончательно оформились две ветви единого телекоммуникационного дерева — передача голоса (телефония) и данных (телеграф). Однако проводная связь в ту эпоху оказалась проще, надежнее, защищеннее. Начался век проводных телекоммуникаций. Тысячи километров кабелей опутали землю, как паутина. Человечество потребляло все больше информации и все больше увязало в путах медной проволоки и кварцевого оптического волокна.

К концу XX века в технологии связи возникла новая волна — цифровая обработка. Вскоре практически любую информацию перед трансляцией, будь то речь или телевизионная картинка, стали преобразовывать в поток нулей и единиц. Настала эпоха цифровой связи. Благодаря цифровой обработке все теснее переплелись развивавшиеся параллельно технологии телефонии и передачи данных, чтобы с появлением пакетных сетей слиться практически воедино. Появился даже термин «мультимедиа», означающий объединение самых различных информационных технологий (голос, аудио/видео, данные) в единой технологической среде обработки и передачи. Взрывоподобное развитие Интернета лишь подтвердило тот факт, что цифровые сети для современной цивилизации стали столь же необходимы, как автострады, трубопроводы и линии электропередачи.

Локальные и региональные сети проникли во все сферы человеческой деятельности, включая экономику, науку, культуру, образование, промышленность и т. д. Технологию Ethernet (10 Мбит/с) сменили Fast Ethernet/Gigabit Ethernet/10Gigabit Ethernet (100/1000/10000 Мбит/с), в глобальных сетях свершился переход от неторопливой, но сверхнадежной технологии X.25 к Frame Relay, применению стека протоколов TCP/IP, к технологиям ATM и GigaEthernet. Без них невозможны столь привычные сегодня электронная почта, факсимальная и телефонная связь, доступ к удаленным базам данных в реальном масштабе времени, службы новостей, дистанционное обучение, телемедицина, телеконференции, телебиржи, телемагазины и т. д. Исчезли сегодня сети связи — и воцарит хаос. А ведь проводные линии связи так просто разрушить.

Наконец, в конце XX — начале XXI веков человечество начало вырываться из плена проводов. Уровень развития микроэлектроники позволил выпускать массовые дешевые средства беспроводной связи. Бум сотовой связи, сравнимый разве что с ростом производства персональных компьютеров, не замедляется вот уже четверть века. Мобильных телефонов во всем мире уже в несколько раз больше, чем обычных проводных телефонных аппаратов — номинально в абонентах

сотовых сетей числятся 60% населения Земли. Фантастическими темпами развиваются технологии беспроводных локальных сетей, их догоняют персональные беспроводные сети и сети регионального масштаба. Видимо, все возвращается на круги своя — человечество тысячелетиями жило без проводов, хочет без них жить и впредь.

Но мало этого. Развиваются и персональные устройства обработки информации. Сегодня ноутбук, нетбук, наладонный компьютер — привычный аксессуар молодежи. А таким устройствам как пища нужна мультимедийная информация — всегда и везде. Поэтому сегодня мы переживаем период, когда на гребне третьей технологической волны зарождаются сети связи будущего — четвертого (4G) — поколения. Этот термин многие трактуют весьма вольготно. Но мы полагаем, что под 4G следует понимать вполне определенную группу технологий и стандартов, обслуживающих информационные потребности современных мобильных устройств обработки и отображения мультимедийной информации.

В последние десятилетия заметна миграция телекоммуникационных технологий в двух основных направлениях:

- от речевых услуг конечному пользователю к передаче скоростных потоков данных, которая в свою очередь уже делится на целый комплекс различных сервисов, включающих и речь, и данные, и видео;
- от неподвижных пользователей к кочующим (номадическим) и мобильным, что может обеспечить только беспроводная связь.

В монографии рассматривается область, которая является естественным пересечением двух указанных векторов развития телекоммуникационных технологий. Эту область сегодня называют сетями беспроводной связи 4G. Именно современным технологиям широкополосного беспроводного доступа и их переходу к 4G и посвящена данная монография. В качестве основной темы мы рассматриваем технологию WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), но достаточно подробно останавливаемся на конкурирующих и смежных технологиях, таких как IEEE 802.11 (Wi-Fi) и стандарты 3GPP / 3GPP2, включая LTE.

Отметим, что современные телекоммуникационные технологии базируются на совокупности научных, технических и технологических достижений во многих областях, от микроэлектроники и схемотехники до теории связи, вычислительной техники и современных методов организации производства. Теория Максвелла оставалась мало кому понятной абстракцией до ее подтверждения опытами Герца. Кодовое разделение каналов и связь посредством шумоподобных сигналов не вышли бы из стен лабораторий и сложнейших военных систем, если бы не массовое появление дешевых процессоров цифровой обработки сигналов. Интернет остался бы ARPAnet'ом, если бы не лавиноподобное распространение персональных компьютеров и модемов. Сотовые телефоны и пейджеры, Wi-Fi-адAPTERы и цифровое телевидение никогда не увидели бы свет без интеграции успехов в самых разных областях — технических, законодательных, организационных, научных и т. д.

Монография состоит из 11 глав, которые разбиты на четыре виртуальные части. Первая часть (главы 1–3) содержит необходимое описание основ теории передачи информации. В главе 1 мы предлагаем краткий исторический экскурс в историю беспроводной связи, а также вводим основные термины и понятия.

В главах 2 и 3 описаны методы кодирования информации, особенно корректирующего, а также методы модуляции и синтеза сигнально-кодовых конструкций. При рассмотрении методов корректирующего кодирования особое внимание уделяется новейшим и наиболее эффективным схемам, нашедшим свое применение практически во всех рассмотренных в монографии стандартах. К ним относятся три группы кодовых схем — каскадные коды Форни с внутренними сверточными кодами, декодируемыми по алгоритму Виттерби, и внешними кодами Рида–Соломона; блоковые и сверточные турбокоды и низкоплотностные коды Галлагера (коды с малой плотностью проверок на четность). Сначала большое внимание уделяется синтезу сигнально-кодовых конструкций для гауссовского канала без памяти, и лишь затем — для каналов с переменными параметрами. Рассмотренные конструкции являются прообразом ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM) и ортогонального частотного множественного доступа (OFDMA) — основы всех новейших стандартов беспроводной связи.

Вторая часть монографии (главы 4–6) содержит детальное описание той конкурентной среды, в которой развиваются технологии WiMAX. В главе 4 приводится описание стандартов цифрового видео- и радиовещания (DVB, DAB), причем впервые в отечественной литературе описан новейший стандарт второго поколения DVB-T2. В главе 5 подробно описаны сети стандарта IEEE 802.11, включая mesh-сети, а в главе 6 дается подробная справка о развитии стандартов сотовой связи, от первых аналоговых через GSM к стандартам третьего поколения 3G. Опять же, впервые в отечественной литературе приводится описание стандарта сотовой связи LTE.

Третья часть (главы 7–8) состоит из подробного описания самой группы стандартов IEEE 802.16 и соответствующих им технологий WiMAX. Впервые в отечественной литературе в одном месте рассмотрены новейшие стандарты IEEE 802.16 и соответствующие им спецификации архитектуры сети, вырабатываемые WiMAX-форумом, т.е. именно та полная группа объектов, которую и следует называть технологиями WiMAX.

Четвертая часть включает главы 9–11 и содержит технико-организационные основы технологий WiMAX, описание реализованных проектов и оборудования, а также сравнение с другими новейшими технологиями мобильного широкополосного доступа и выводы.

В целом, не являясь руководством разработчика и не заменяя описание стандартов, книга знакомит с основными понятиями и принципами современных беспроводных технологий радиосвязи и может стать основой для последующего глубокого изучения данного предмета. Особо отметим, что отдельные главы можно читать независимо друг от друга, поэтому монографию правомерно рассматривать как справочник по современным беспроводным технологиям передачи информации.

Авторы признательны Владиславу Михайловичу Тамаркину и Андрею Владимировичу Шурдаку за предоставленную информацию по безопасности сетей ШПД, а также Андрею Евгеньевичу Иванову и Светлане Николаевне Куприяхиной за помощь в работе.

Книга предназначена для широкого круга читателей — руководителей ИТ-отделов и подразделений, разработчиков аппаратуры, технических специалистов, связанных с телекоммуникациями, а также для студентов соответствующих специальностей и всех, кто интересуется современными технологиями связи.

# **ГЛАВА I**

## **БЕСПРОВОДНЫЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ИСТОРИЯ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ**

Бурное развитие беспроводных сетей передачи информации в России и во всем мире, о котором многие говорят как о беспроводной революции в области передачи информации [1–3], связано с такими их достоинствами, как:

- гибкость архитектуры, т. е. возможности динамического изменения топологии сети при подключении, передвижении и отключении мобильных пользователей без значительных потерь времени;
- высокая скорость передачи информации (1–1000 Мбит/с и выше);
- быстрота проектирования и развертывания;
- высокая степень защиты от несанкционированного доступа;
- отказ от дорогостоящей и не всегда возможной прокладки или аренды оптоволоконного или медного кабеля.

Но прежде чем стать столь привычными, технологии беспроводной связи пропали более чем 150-летний путь развития. Чтобы более полно проникнутся величием того, что вскоре назовут связью 4G, кратко рассмотрим основные вехи строительства этого грандиозного здания, имя которому — глобальные беспроводные телекоммуникации.

### **I.I. Исторический очерк развития сетевых технологий**

Беспроводные сети передачи информации, как следует из их названия, базируются на совокупности двух групп технологий — беспроводной передачи информации и сетевого взаимодействия. Исторически эти технологии зародились еще в позапрошлом веке. Родоначальником всех электронных сетей (систем) передачи данных, видимо, следует считать американского художника Самуэля Финли Бриза Морзе. В 1837 г. он разработал свою систему электросвязи по металлическому проводу и дал ей название «телеграф». Годом позже он дополнил ее знаменитой азбукой Морзе, т. е. механизмом кодирования источника, обязательным элементом всех современных сетей. 24 мая 1844 г. между Балтийром и Вашингтоном состоялся первый публичный сеанс телеграфной связи. Уже через 14 лет был проложен первый трансатлантический кабель, правда, просуществовал он лишь 26 дней.

В 1874 г. французский инженер Жан Морис Эмиль Бодо (Baudot) изобрел телеграфный мультиплексор, позволявший по одному проводу передавать до шести

телеграфных каналов. Значимость этого изобретения и авторитет Бодо были столь высоки, что, когда в 1877 г. другой французский инженер, Томас Муррэй, разработал первый в истории символьный телеграфный код с фиксированным размером символа (5 бит на символ), он назвал его кодом Бодо. Известный также под названием телексный код, он с незначительными изменениями применяется и сегодня (наиболее распространенная версия — стандартизированный Международным консультативным комитетом по телефонии и телеграфии (ССИТТ) Международный алфавит № 2). В честь Бодо названа и единица измерения скорости передачи телекоммуникационных символов (бод).

Следующий шаг сделали изобретатели телефона — профессор физиологии органов речи Бостонского университета Александр Грэйхем Белл при участии Томаса Ватсона (1875 г., приоритет от 14 февраля 1876 г.) и независимо от них — Элайша Грей в Чикаго. Последнему также принадлежит немалая роль в развитии сетевых технологий. Именно он в 1888 г. запатентовал Telautograph — первое устройство передачи факсимильных сообщений. Но это были лишь предпосылки сетей, а именно способы формирования канала связи и работы в нем. Сеть — это совокупность многих каналов, которыми необходимо управлять (коммутировать). В первых сетях, начиная с 1880 г., этим занимались телефонистки (вернее, телефонисты) методом установки штекеров в коммутационном поле.

С 1889 г. начался новый этап в развитии сетевых технологий — владелец бюро похоронных услуг из Канзас-Сити Элмон Браун Строуджер разработал систему автоматической коммутации каналов. Именно ему принадлежит приоритет в создании шагового искателя и декадно-шаговых АТС. Предание гласит, что Строуджер столкнулся с промышленной диверсией — жена его конкурента по цеху в Канзас-Сити работала телефонисткой и все звонки гробовщику направляла своему мужу. Видимо, это был один из первых в мире случаев электронного шпионажа. Он так возмутил Строуджера, что заставил изыскать способ избавиться от телефонисток на станции. Изобретение Строуджера оказалось столь удачным, что в 1891 г. он основал компанию Strowger Automatic Exchange (с 1901 г. — Automatic Electric, сегодня — отделение компании General Telephone and Electronics, GTE). Первая АТС этой компании емкостью 99 номеров была запущена в коммерческую эксплуатацию в 1892 г. (Ла-Порт, шт. Индиана). Примечательно, что на первых телефонных аппаратах для работы с АТС номер набирался посредством кнопок. В 1897 г. компания Строуджера представила прототип первого аппарата с дисковым номеронабирателем.

В 1885 г. произошло еще одно ключевое для сетевых технологий событие. Первые АТС обеспечивали одновременное соединение всех возможных пар абонентов. Очевидно, что при росте номерной емкости коммутационные матрицы становились невероятно дорогими и сложными. Впервые возникла проблема доступа к ограниченному коммутационному ресурсу. Ее разрешил российский инженер М. Ф. Фрейденберг, показавший, что для 10 тыс. абонентов достаточно обеспечить возможность одновременного соединения любых 500 пар. Отметим, что результат Фрейденberга справедлив и сегодня, для современных АТС: на 10 тыс. номеров допустимая вероятность предоставления соединения составляет 0,125. В 1895 г. М. Ф. Фрейденберг совместно с другим русским инженером С. М. Бердичевским-Апостоловым разработал и запатентовал в Великобритании АТС с предыскателем, выбиравшим свободный комплект линейных искателей при снятии абонентом трубки. Предыскатель и его принцип свободного поис-

ка стал основой для проектирования всех будущих АТС. Примерно с 1910 г. (к окончанию срока действия патента Строуджера) началось массовое внедрение электромеханических АТС. Работу, начатую М.Ф. Фрейденбергом, до логического завершения довел датский математик А.К. Эрланг, опубликовавший в 1909 г. ставшую классической работу «Теория вероятностей и телефонные переговоры» («The Theory of Probabilities and Telephone Conversations»), в которой предложил формулы для вычисления числа абонентов АТС, желающих одновременно вести разговоры.

Работы А.К. Эрланга положили начало нового научного направления — теории очередей (теории массового обслуживания), широко используемой первоначально для расчетов в телефонии, а затем при проектировании сетей передачи информации. Значительный вклад в развитие теории очередей внес выдающийся российский математик Александр Яковлевич Хинчин (Математическая теория стационарной очереди: Математический сборник, 1932, т. 39, № 4. О формулах Эрланга в теории массового обслуживания. Теория вероятностей и ее применения, 1962, т. 7, вып. 3.), выполнивший ряд оригинальных исследований для Московской телефонной сети.

В 1909 г. генерал-майор корпуса связи США доктор философии Джордж Оуэн Сквэр изобрел способ посылки по телефонной линии нескольких радиограмм одновременно — родился метод частотного разделения каналов.

В 1928 г. американский физик-электрик и изобретатель Гарри Найквист в статье «Некоторые вопросы теории телеграфной передачи» («Certain Topics in Telegraph Transmission Theory») изложил принципы преобразования аналоговых сигналов в цифровые и сформулировал знаменитую теорему Найквиста. В СССР ее называли теоремой Котельникова, хотя Владимир Александрович опубликовал аналогичные результаты через пять лет после Найквиста. Но история все нивелирует — основополагающая теорема Клода Элвуда Шеннона о пропускной способности канала (1948) была сформулирована Котельниковым в его докторской диссертации годом раньше, в 1947 г. Однако у нас ее называют теоремой Шеннона.

В 1938 г. американец А.Х. Риверс патентует метод преобразования сигнала из аналоговой формы в цифровую для коммутации и передачи, названный импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ). Этот метод впервые был практически реализован учеными из Bell Laboratories Клодом Шенноном, Джоном Р. Пирсом и Бернардом М. Оливером в быстродействующей цифровой передающей системе, позволившей транслировать несколько телефонных разговоров по одному каналу с высоким качеством, — появилась система с временным разделением (уплотнением) каналов.

Начиная с 1950-х годов сетевые и беспроводные технологии начали сближаться настолько тесно, что зачастую грань между ними провести уже трудно.

Беспроводные технологии также зарождались в XIX веке. Идея носилась в воздухе, вплотную к ней подошли такие ученые, как Г. Герц, О. Лодж, Э. Бранли. В 1892 г. английский ученый Вильям Крукс теоретически показал возможность и описал принципы радиосвязи. В 1893 г. сербский ученый Никола Тесла в США продемонстрировал передачу сигналов на расстояние. Тогда это событие не вызвало должного резонанса, возможно, потому, что Н. Тесла, работы которого существенно опережали время, интересовался беспроводной передачей на расстояние не информации, а энергии.

С 1878 г. над проблемой беспроводной связи работал преподаватель минных классов в Кронштадте Александр Степанович Попов. В 1884 г. он изобрел первую приемную антенну, создал прибор для регистрации грозовых разрядов на основе когерера — стеклянной трубы, заполненной металлическими опилками. Под воздействием электромагнитного поля проводимость этой трубы резко возрастила. 7 мая 1895 г. на заседании физического отделения Российского физико-химического общества состоялся его исторический доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям». Тогда А. С. Попов продемонстрировал свой прибор для регистрации грозовых разрядов («грозоотметчик») и высказал мысль о возможности его применения для беспроводной связи. Первая публичная демонстрация прототипа всех грядущих беспроводных систем состоялась 24 марта 1896 г. на заседании того же физико-химического общества. А. С. Попов передал на расстояние 250 м, возможно, первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц».

С 1894 г. успешно экспериментировал с физическими приборами для генерации и регистрации электромагнитных колебаний и двадцатилетний итальянский юноша Гульельмо Маркони, будущий нобелевский лауреат. В 1895 г. он установил связь на расстоянии порядка двух миль, а уже в 1896 г. запатентовал свое изобретение (в 1943 г. его патенты были аннулированы в пользу Н. Тесла [4]), в 1901-м установил радиосвязь через Атлантику.

В 1906 г. Ли де Форест создал первую электронную лампу (триод) — появилась возможность строить электронные усилители сигналов. С тех пор беспроводная связь развивалась — и продолжает по сей день — семимильными шагами, главным образом благодаря достижениям электроники. Отметим лишь основные вехи.

С 1920-х годов началось коммерческое радиовещание (посредством амплитудной модуляции). В 1933 г. Эдвин Ховард Армстронг изобрел частотную модуляцию (ЧМ), с 1936 г. началось коммерческое ЧМ-радиовещание. В 1946 г. компании AT&T и Bell System приступили к эксплуатации системы подвижной телефонной связи (MTS) для абонентов с автомобильными радиотелефонами (20 Вт). Для полудуплексной связи использовалось шесть каналов шириной по 60 кГц на частоте 150 МГц, однако из-за межканальной интерференции число каналов вскоре сократили до трех. Система позволяла соединяться с городской телефонной сетью.

12 августа 1960 г. был выведен на орбиту высотой 1500 км первый спутник связи — американский космический аппарат (КА) «Эхо-1» (Echo-1). Это был надувной шар с металлизированной оболочкой диаметром 30 м, выполнявший функции пассивного ретранслятора. Через два года, 10 июля и 13 декабря 1962 г., в США на низкие орбиты были запущены соответственно КА Telstar I и Relay-1 — первые спутники с активными ретрансляторами. Мощность их передатчиков не превышала 2 Вт. 19 августа 1964 г. впервые спутник связи был выведен на геостационарную орбиту. Это был также американский Syncom-3 (первые две попытки вывода в 1963 г. были неудачными). На следующий день был создан международный консорциум спутниковой связи Intelsat (International Telecommunications Satellite Organization), который стал крупнейшей международной организацией в области спутниковой связи. Сегодня ее услугами пользуются более чем в 200 странах, причем в начале 2001 г. 2/3 всего международного трафика передавалось через спутники Intelsat. 23 апреля

1965 г. был выведен на орбиту и начал успешно работать первый отечественный спутник связи «Молния-1» (также с третьей попытки). Мир вступил в эру спутниковой связи.

В истории сетевых технологий очередной этап начался в 1960-е годы и связан с массовым появлением компьютеров. Возникла потребность в передаче большого объема данных, зародилось понятие локальной вычислительной сети (ЛВС). Был разработан механизм коммутации сообщений (пакетов). В 1960-е годы над построением сети с коммутацией пакетов работали (параллельно, практически ничего не зная друг о друге) специалисты в трех организациях: в Массачусетском технологическом институте (MIT), корпорации RAND (тогда по сути центр стратегических исследований BBC США, создавалась как подразделение компании Douglas Aircraft, с 1948 г. — независимая компания) и Национальной британской физической лаборатории (NPL). Пионерской работой в этой области явилась диссертация Леонарда Клейнрока на соискание степени доктора философии в MIT «Информационный поток в больших коммуникационных сетях» (*Information Flow in Large Communication Nets*, 1961). В 1964 г. была опубликована работа сотрудника корпорации RAND Пола Барана «О распределенных коммуникациях» (*On Distributed Communications*). В ней были сформулированы принципы избыточной коммуникативности и показаны различные модели формирования коммуникационной системы, способной успешно функционировать при наличии значительных повреждений. В 1965 г. Лоуренс Робертс из MIT совместно с Томасом Меррилом связал компьютер TX-2 в Массачусетсе с ЭВМ Q-32 в Калифорнии по низкоскоростной коммутируемой телефонной линии. Так была создана первая нелокальная компьютерная сеть. Она убедительно продемонстрировала, что сеть с коммутацией соединений (каналов) неприемлема для таких задач.

В 1962 г. в журнале «Коммунист» (№ 12) появилась статья академика АН СССР Александра Александровича Харкевича «Информация и техника». В ней впервые в мире были сформулированы основные принципы создания единой сети связи (ЕСС), предугадана важность цифровых методов передачи и коммутации различных видов информации в цифровой форме. ЕСС, по мнению А.А. Харкевича, должна представлять собой крупнейший инженерный комплекс, объединяющий все существующие сети связи и развивающийся путем планомерного его наращивания в органическом взаимодействии с системой вычислительных, управляющих и справочных центров.

Знаковыми для сетевых технологий стали 1967–1968 гг. В NPL заработала первая ЛВС с пакетной коммутацией, во многом благодаря ее директору Дональду Дэвису. Сеть работала с пиковой скоростью — до 768 кбит/с (в начале 1970-х гг. она объединяла порядка 200 компьютеров со скоростью обмена до 250 кбит/с). В том же 1968-м г. сотрудник шведского отделения компании IBM Олаф Содерблум разработал сеть Token Ring. МО США одобрило версию первого в мире стандарта на ЛВС — MIL-STD-1553 (протокол обмена данными по общему последовательному каналу посредством манчестерского линейного кода с выделенным контроллером (отечественный аналог — ГОСТ 26765.52–87)). Этот стандарт после ряда модификаций до сих пор применяется в бортовых системах.

Но самое главное — в октябре 1967 г. был представлен начальный план сети ARPANET, развитием которой занимался департамент методов обработки

информации IPTO (Information Processing Techniques Office) агентства перспективных исследовательских проектов ARPA (Advanced Research Projects Agency) МО США. В декабре 1968 г. группа во главе с Фрэнком Хартом из компании Bolt, Beranek и Newman (BBN) выиграла конкурс ARPA на создание так называемого интерфейсного процессора сообщений (Interface Message Processor). В 1969 г. в рамках программы ARPANET в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе «отец» пакетной коммутации Леонард Клейнрок построил первый узел ARPANET — прообраз грядущего Интернета. В том же году компания BBN установила в Калифорнийском университете первый интерфейсный процессор сообщений и подключила к нему первый компьютер. Второй узел был образован в Стэнфордском исследовательском институте (SRI). Двумя следующими узлами ARPANET стали Калифорнийский университет в Санта-Барбара и Университет штата Юта. Эмбрион Интернета начал делиться.

В 1970 г. появилась первая пакетная радиосеть передачи данных (через спутник) — знаменитая ALOHA (aloha — приветствие в гавайском диалекте английского языка). Ее разработал и построил Норман Абрамсон (совместно с Франком Куо и Ричардом Биндером) из Гавайского университета. Сеть связывала различные университетские учреждения, разбросанные по отдельным островам Гавайского архипелага. В 1972 г. ALOHA соединили с сетью ARPANET. В ALOHA был реализован принцип подтверждения и повторной посылки пакетов (ARQ), а также механизм множественного доступа к каналу с контролем несущей CSMA. Тогда же начали развиваться проекты создания пакетных радиосетей, в том числе спутниковых.

В октябре 1972 г. известный специалист из компании BBN Роберт Кан на международной конференции по компьютерным коммуникациям впервые публично продемонстрировал работу сети ARPANET. В 1974 г. появляется статья Вирта Серфа (сотрудника Стэнфордского исследовательского института) и Роберта Кана (Cerf V.G., Kahn R.E. A protocol for packet network interconnection // IEEE Trans. Comm. Tech. Vol. COM-22. V. 5. May 1974. P. 627–641), в которой впервые была описана концепция протокола TCP/IP. В том же году компания BBN запустила первую открытую службу пакетной передачи данных (коммерческая версия ARPANET) — известный сегодня любому специалисту Telnet.

В 1973 г. сотрудник исследовательского центра компании Xerox в Пал-Альто Роберт Метклэф, до прихода в Xerox защитивший в МИТ докторскую диссертацию в области теории пакетной передачи информации и участвовавший в создании сети ARPANET, представил своему руководству докладную записку, в которой впервые появилось слово Ethernet (эфирная сеть). В том же году Метклэф совместно с Дэвидом Боггсом построил первую Ethernet-ЛВС, связывавшую два компьютера со скоростью 2,944 Мбит/с. В основу технологии Ethernet был положен усовершенствованный принцип CSMA/CD с обнаружением коллизий. Через шесть лет, в 1979 г., при активном участии Р. Метклэфа три ведущие в своих областях компании США — Xerox, Intel и Digital Equipment (DEC) — начали процесс стандартизации протокола Ethernet, успешно завершившийся через год. В том же 1979 г. Метклэф при участии DEC основал знаменитую компанию 3COM для выпуска Ethernet-совместимого оборудования.

В 1976 г. CCITT выпустила рекомендацию X.25, которая стала первым и чрезвычайно успешным стандартом сети с пакетной передачей данных по вы-

деленному каналу (Interface between DTE and DCE for Terminal Operations in Packet Mode and Connected to Public Data Networks by Dedicated Circuit). Мас-совая пакетная коммуникация стала реальностью.

В 1977 г. будущий вице-президент компании Sony Марио Токоро и другой японский ученый Киичироу Тамару предложили метод адаптации технологии Ethernet к передаче данных через радиоканал посредством механизма подтверждений (Acknowledging Ethernet). Эта работа заложила основу будущих беспроводных ЛВС (IEEE 802.11 и IEEE 802.15).

В 1978 г. в Бахрейне телефонная компания Batelco (Bahrain Telephone Company) начала эксплуатацию коммерческой системы беспроводной телефонной связи, которая считается первой в мире реальной системой сотовой связи. Две зоны с 20 каналами в диапазоне 400 МГц обслуживали 250 абонентов. Использовалось оборудование японской компании Matsushita Electric Industrial. В том же году в Чикаго компания AT&T начала испытания сотовой системы Advanced Mobile Phone Service (AMPS), работающей в диапазоне 800 МГц. Сеть из 10 зон охватывала связью 54 тыс. км<sup>2</sup>.

В 1977 г. Деннис Хайес основал компанию Hayes Microcomputer Products и выпустил на рынок первый массовый модем Micromodem II для персональных компьютеров (Apple II). Он работал со скоростью 110/300 бит/с и стоил 280 долл. В 1979 г. в Женеве CCITT утверждает первую модемную рекомендацию V.21, определяющую стандартный протокол модуляции на скорости 300 бит/с.

Новый этап начался в 1980 г., когда стек протоколов TCP/IP был принят в качестве военного стандарта США. Годом раньше пакетная радиосеть заработала на военной базе США Форт-Брэгг. В 1983 г. сеть ARPANET была переведена на протокол TCP/IP взамен действовавшего изначально NCP. Из ARPANET, которую вскоре все стали называть Интернетом, выделилась сеть MILNET, обслуживающая оперативные нужды МО США.

События периода 1960-х годов в области сетевых технологий описаны во множестве книг, воспроизводить которые здесь невозможно, да и не нужно. За каждой датой, за каждым событием стоят напряженная работа и выдающиеся достижения специалистов всего мира. В это время сетевые технологии непрерывно развивались в сторону повышения быстродействия и надежности сетей передачи информации, возможности интегрированной передачи данных, голоса и видеинформации. Так, в области локальных сетей было создано семейство технологий Ethernet-Fast Ethernet-Gigabit Ethernet, обеспечивающих иерархию скоростей 10/100/1000 Мбит/с. В глобальных сетях произошел переход от технологии X.25 к технологии Frame Relay, использованию стека протоколов TCP/IP, ATM и Gigabit Ethernet.

Важно отметить, что и в СССР работало немало выдающихся ученых и специалистов в области систем связи, в том числе и беспроводной. Уже в 1970–1980-х годах проектировались и строились современные сети связи, например, система цифровой телефонной связи «Кавказ-5», многочисленные ведомственные сети связи. Хорошо известны системы «Сирена» (первая в СССР гражданская сеть пакетной коммутации) и «Экспресс» для автоматизации бронирования и продажи авиа- и железнодорожных билетов соответственно. Но, видимо, закрытость как самих работ, так и общества никак не согласовывалась с концепцией открытых сетей. Возможно, именно поэтому изначально созданная на деньги МО США

открытая сеть Интернет завоевала весь мир, породила множество сетевых технологий, стимулировала развитие смежных отраслей, прежде всего разработку соответствующей аппаратуры и элементной базы для нее, т. е. микроэлектронику.

Видимо, именно Интернету мы исторически обязаны тем, что сегодня беспроводные сети получили столь бурное развитие. Их появление было бы невозможно без соответствующей полупроводниковой элементной базы. А она, в свою очередь, не может появиться, если нет массового (многомиллионного) спроса. Историческая заслуга и гениальное пророчество тех, кто в 1960-е годы начинал работы по сетям пакетной передачи, в том, что они изначально сумели сформулировать принципы будущей глобальной сети и воплотили их. Тем самым был создан рынок устройств для работы в сети, ставший основой для промышленности и науки в этой области. Не случайно первым директором (с 1962 г.) департамента ИРТО в ARPA, т. е. человеком, руководившим финансированием научных исследований в области компьютерных сетей, был психолог из Массачусетского технологического института Джозеф Карл Ликлайдер. Еще в начале 1960-х годов он сумел предвидеть появление глобальной сети взаимосвязанных компьютеров. Ему принадлежит ряд публикаций о концепции «галактической сети» (*Licklider J.C.R. // On-Line Man Computer Communication, August 1962*).

Разумеется, не менее основополагающим для беспроводных сетей стало массовое появление персональных компьютеров и развитие сотовой телефонии, а также стремительное развитие полупроводниковых технологий (создание дешевых сигнальных процессоров и микроконтроллеров, аналоговых СВЧ интегральных схем).

С 1989 года началось развитие стандартов IEEE 802.11 беспроводных локальных сетей. Постепенно они получили широчайшее развитие и стали использоваться на «последней миле» и для создания сетей беспроводного доступа регионального масштаба. Отдельно развивалась линия WLL (беспроводной абонентский доступ) — технология, разработанная компанией AT&T. WLL использовала пакетную передачу голоса и данных со скоростью 128 кбит/с, являясь узкополосной беспроводной системой с временным распределением. Ряд подобных систем был коммерчески доступен в 1990-е годы. Желание совместить широкополосность стандарта IEEE 802.11 и надежность систем операторского класса в лицензионных диапазонах привело к созданию стандарта IEEE 802.16. Изначально он задумывался как технология фиксированного доступа — транспортная сеть распространения информации регионального масштаба. Однако со временем, во многом благодаря усилию международной организации WiMAX-форума, этот стандарт превратился в технологию мобильного широкополосного доступа, т. е. стал ориентированным на конечных пользователей. Таким образом, у технологий сотовой связи появился мощный конкурент. Те не замедлили с адекватным ответом. В результате сегодня мы говорим о зарождении технологий связи четвертого поколения (4G).

## I.2. Классификация и технологии беспроводных сетей

Классификация чего бы то ни было — задача неблагодарная, поскольку и критерии классификации можно разработать достаточно много, и реальные объекты могут не укладываться в четкие границы определенного класса, да и по ме-



























































Для получения полной версии книги в электронном виде пройдите по ссылке:

[www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=601385](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=601385)

Сайт издательства

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)



РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
**ТЕХНОСФЕРА**

## Оптовая продажа книг

Телефон: +7(495) 234-01-10 (доб. 335)

Факс: +7(495) 956-33-46

e-mail: [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)

---

## Книга-почтой

Почтовый адрес:

125319, г. Москва, а/я 91

Факс: +7(495) 956-33-46

e-mail: [pochta@technosphera.ru](mailto:pochta@technosphera.ru)

[www.technosphera.ru](http://www.technosphera.ru)

*Указанные в каталоге цены*

*не включают в себя стоимость*

*почтовой доставки по России.*



ТЕХНОСФЕРА

Рекламно-издательский центр

# **Книги издательства ЗАО «РИЦ «Техносфера» вы можете приобрести в магазинах:**

## **г. Москва:**

- ▶ Сеть магазинов «Буква»
- ▶ Библио-Глобус
- ▶ Московский Дом Книги
- ▶ Пресбург на Ладожской
- ▶ ДК на Соколе
- ▶ ДК Новый
- ▶ ДК Студент
- ▶ Дом Медицинской Книги
- ▶ Молодая Гвардия
- ▶ Фолиант
- ▶ СК Олимпийский (1-й этаж, место № 6)

## **г. Санкт-Петербург:**

- ▶ Санкт-Петербургский Дом книги (Дом Зингера)

## **г. Екатеринбург:**

- ▶ Екатеринбургский Дом Книги
- ▶ 100 000 книг на Декабристов

## **г. Архангельск:**

- ▶ АВФ- книга

## **г. Новосибирск**

- ▶ Сеть магазинов «Аристотель»

## **г. Сыктывкар**

- ▶ Бук-Трейд

## **г. Ростов-на-Дону**

- ▶ Деловая литература
- ▶ Сеть магазинов «Магистр»

## **г. Томск**

- ▶ Академкнига

## **г. Омск**

- ▶ Техническая книга

## **г. Уфа**

- ▶ Мир книги

## **г. Челябинск**

- ▶ ЧелябинскКнига

## **г. Волгоград**

- ▶ Либрис

## **г. Воронеж**

- ▶ Регион-книга

## **Киоски при университетах:**

- РХТУ им. Менделеева
- МГУ, химфак
- МИСИС
- МИЭТ
- МИРА
- МИФИ

## **Ближнее зарубежье:**

## **Белоруссия**

## **г. Минск**

- ▶ ИП Юззвук НН (тел. 375-17-294-54-65)
- ▶ Техническая книга (тел. 375-17-293-39-75)

## **Украина**

## **г. Харьков**

- ▶ ЧП Кудь (тел. 057-7-54-91-16)