

Содержание

Предисловие	19
Сокращения	26
Обозначения	32
Глава 1	
Обзор систем беспроводной связи	35
1.1. История беспроводной связи	36
1.2. Перспективы развития беспроводной связи	41
1.3. Технические решения	44
1.4. Современные беспроводные системы	47
1.4.1. Сотовые телефонные системы	48
1.4.2. Беспроводные телефоны	56
1.4.3. Беспроводные локальные вычислительные сети — беспроводные ЛВС	59
1.4.4. Региональные беспроводные сети передачи данных	61
1.4.5. Широкополосный беспроводный доступ	62
1.4.6. Пейджинговые системы	63
1.4.7. Спутниковые сети	64
1.4.8. Недорогая радиосвязь малой мощности: Bluetooth и ZigBee... ..	66
1.4.9. Системы сверхширокополосной радиосвязи	68
1.5. Беспроводный спектр	69
1.5.1. Методы распределения спектра	69
1.5.2. Распределение спектра частот в существующих системах ..	71
1.6. Стандарты	73
Задачи	74
Литература	76
Глава 2	
Потери на трассе распространения радиоволн и экранирование	78
2.1. Распространение радиоволн	80
2.2. Модели передачи и приема сигнала	81
2.3. Потери при распространении сигнала в свободном пространстве	84
2.4. Построение траекторий лучей	86
2.4.1. Двухлучевая модель	88
2.4.2. Десятилучевая модель (диэлектрическое ущелье)	92



2.4.3.	Общая схема построения лучей	94
2.4.4.	Среднее значение локальной принимаемой мощности	98
2.5.	Экспериментальные модели потерь в тракте распространения сигнала	99
2.5.1.	Модель Окумуры	100
2.5.2.	Модель Хата	101
2.5.3.	Расширенная модель COST 231 Хата	101
2.5.4.	Кусочно-линейная модель (с несколькими склонами)	102
2.5.5.	Параметры затухания при распространении внутри зданий	103
2.6.	Упрощенная модель потерь в тракте передачи	105
2.7.	Замирания экранирования	108
2.8.	Комбинация потерь в тракте передачи и экранирования	112
2.9.	Вероятность перерывов связи в тракте передачи из-за потерь и экранирования	113
2.10.	Зона покрытия сотовой связи	114
	Задачи	118
	Литература	124

Глава 3

	Статистические модели каналов многолучевого распространения	128
3.1.	Импульсная характеристика нестационарного канала	129
3.2.	Модели замираний в узкополосных каналах	136
3.2.1.	Автокорреляция, взаимная корреляция и спектральная плотность мощности	138
3.2.2.	Огибающая и распределение мощности	146
3.2.3.	Скорость пересечения уровней и средняя продолжительность замираний	149
3.2.4.	Каналы с конечным числом состояний Маркова	152
3.3.	Модели замираний в широкополосных каналах	153
3.3.1.	Профиль задержек	158
3.3.2.	Полоса когерентности	161
3.3.3.	Доплеровский спектр мощности и время когерентности канала	164
3.3.4.	Преобразования автокорреляции и функции рассеяния	165
3.4.	Дискретно-временная модель	166
3.5.	Пространственно-временные модели каналов	168
	Задачи	169
	Литература	174

Глава 4

Пропускная способность беспроводных каналов	176
4.1. Пропускная способность канала с аддитивным белым гауссовым шумом — AWGN	178
4.2. Пропускная способность каналов с амплитудными замираниями ..	180
4.2.1. Модель канала и системы	180
4.2.2. Известная информация о канальном распределении	182
4.2.3. Наличие дополнительной информации о канале в приемнике	183
4.2.4. Наличие дополнительной информации о канале в передатчике и приемнике	188
4.2.5. Пропускная способность канала с разнесенным приемом	198
4.2.6. Сравнительная оценка пропускной способности	199
4.3. Пропускная способность каналов с частотно-селективными замираниями	203
4.3.1. Стационарные каналы	203
4.3.2. Нестационарные каналы	206
Задачи	209
Литература	214

Глава 5

Цифровая модуляция и демодуляция	216
5.1. Анализ пространства сигналов	218
5.1.1. Модель сигнала и системы	219
5.1.2. Геометрическое представление сигналов	221
5.1.3. Структура приемника и достаточная статистика	224
5.1.4. Области решений и критерий максимального правдоподобия	228
5.1.5. Вероятность ошибки и граница объединения	231
5.2. Принципы модуляции в ограниченной полосе пропускания	237
5.3. Амплитудная и фазовая модуляция	238
5.3.1. Амплитудно-импульсная модуляция — АИМ	240
5.3.2. Фазовая манипуляция — ФМН	243
5.3.3. Квадратурная амплитудная модуляция — КАМ	245
5.3.4. Относительная модуляция	246
5.3.5. Формирование созвездий	250
5.3.6. Квадратурный сдвиг	250
5.4. Частотная модуляция	252
5.4.1. Частотная манипуляция ЧМН и манипуляция с минимальным сдвигом (MSK)	254



5.4.2.	Частотная манипуляция с непрерывной фазой — ЧМН-НФ	255
5.4.3.	Некогерентное детектирование при ЧМН.....	256
5.5.	Формирование импульсов.....	257
5.6.	Символьная синхронизация и восстановление фазы несущего сигнала.....	261
5.6.1.	Структура приемника с восстановлением тактовой частоты и фазы.....	263
5.6.2.	Оценка фазы по критерию максимального правдоподобия....	265
5.6.3.	Оценка сигнала тактовой частоты по критерию максимального правдоподобия	268
	Задачи.....	271
	Литература	275
	Глава 6	
	Характеристики цифровой модуляции в беспроводных каналах	276
6.1.	Каналы с аддитивным белым шумом AWGN.....	276
6.1.1.	Отношение сигнал – шум и энергия на бит или символ.....	277
6.1.2.	Вероятность ошибки при ФМ2 и ФМ4.....	278
6.1.3.	Вероятность ошибки при ФМН.....	280
6.1.4.	Вероятность ошибки при АИМ и КАМ	282
6.1.5.	Вероятность ошибки при ЧМН и ЧМН-НФ	285
6.1.6.	Приближенные значения вероятности ошибки при когерентной модуляции	286
6.1.7.	Вероятность ошибки при относительной модуляции	287
6.2.	Альтернативное представление Q -функции.....	288
6.3.	Замирания	290
6.3.1.	Вероятность перерывов радиосвязи	291
6.3.2.	Средняя вероятность ошибки.....	292
6.3.3.	Расчет средней вероятности ошибки через производящую функцию моментов.....	295
6.3.4.	Комбинация вероятности нарушения связи со средней вероятностью ошибки.....	301
6.4.	Доплеровское расширение.....	303
6.5.	Межсимвольная интерференция	306
	Задачи.....	309
	Литература	317

Глава 7

Разнесение сигналов на приеме и передаче	319
7.1. Реализация каналов с независимыми замираниями.....	320
7.2. Разнесение сигналов в приемнике.....	322
7.2.1. Модель системы.....	322
7.2.2. Селективное объединение.....	326
7.2.3. Пороговое объединение.....	330
7.2.4. Суммирование дифференциально-взвешенных сигналов....	333
7.2.5. Линейное объединение сигналов равной мощности.....	337
7.3. Разнесение сигналов в передатчике.....	339
7.3.1. Информация о канале, известная передатчику.....	339
7.3.2. Схема Аламоути — передатчику неизвестна информация о канале.....	341
7.4. Анализ разнесения с помощью производящих функций моментов.....	343
7.4.1. Анализ разнесенного приема при дифференциальном взвешивании MRC.....	344
7.4.2. Анализ разнесения при линейном EGC и селективном SC сложении сигналов.....	349
7.4.3. Анализ разнесенного приема при некогерентной и диф- ференциальной когерентной модуляции.....	350
Задачи.....	350
Литература	353

Глава 8

Кодирование в беспроводных каналах	355
8.1. Обзор систем кодирования.....	356
8.2. Линейные блочные коды.....	359
8.2.1. Двоичные линейные блочные коды.....	360
8.2.2. Порождающая матрица.....	362
8.2.3. Матрица контроля четности и синдромный контроль.....	364
8.2.4. Циклические коды.....	366
8.2.5. Декодирование с жестким решением.....	369
8.2.6. Вероятность ошибки при декодировании с жестким ре- шением в канале с аддитивным белым шумом AWGN.....	372
8.2.7. Вероятность ошибки при декодировании с мягким реше- нием в канале с аддитивным белым шумом AWGN.....	375
8.2.8. Примеры распространенных линейных блочных кодов.....	377
8.2.9. Недвоичные блочные коды: код Рида–Соломона.....	378
8.3. Сверточные коды.....	380

8.3.1.	Характеристика кода: решетчатая диаграмма	381
8.3.2.	Декодирование методом максимального правдоподобия ...	384
8.3.3.	Алгоритм Витерби	388
8.3.4.	Свойства расстояния	390
8.3.5.	Диаграммы состояния и передаточные функции	391
8.3.6.	Вероятность ошибки сверточных кодов.....	394
8.4.	Каскадные коды	397
8.5.	Турбо-коды	398
8.6.	Коды с проверкой на четность низкой плотности	401
8.7.	Кодовая модуляция	403
8.8.	Кодирование и чередование в каналах с замираниями	409
8.8.1.	Блочное кодирование с чередованием.....	410
8.8.2.	Сверточное кодирование с чередованием.....	413
8.8.3.	Кодовая модуляция с чередованием символов/бит.....	414
8.9.	Коды с неравномерной защитой от ошибок.....	415
8.10.	Совместное кодирование источника и канала.....	419
	Задачи.....	421
Литература		426

Глава 9

Адаптивная модуляция и кодирование

9.1.	Система с адаптивной передачей.....	432
9.2.	Методы адаптации.....	435
9.2.1.	Методы адаптации, основанные на изменении скорости передачи	435
9.2.2.	Методы адаптации, основанные на изменении мощности.....	436
9.2.3.	Различная вероятность ошибки	438
9.2.4.	Методы переменного кодирования.....	438
9.2.5.	Гибридные методы	439
9.3.	МКАМ с переменной скоростью и переменной мощностью	440
9.3.1.	Граничные значения вероятности ошибок	440
9.3.2.	Схемы с адаптацией скорости и мощности	441
9.3.3.	Инверсия в канале с фиксированной скоростью	443
9.3.4.	Адаптация при дискретной скорости	446
9.3.5.	Средняя продолжительность зоны замираний	452
9.3.6.	Точная вероятность цифровой ошибки в сравнении с при- ближенной.....	455
9.3.7.	Ошибка оценивания и задержка	457
9.3.8.	Адаптивная кодовая модуляция.....	460
9.4.	Основные виды многоуровневой модуляции	463

9.4.1.	Адаптация с непрерывной скоростью.....	463
9.4.2.	Адаптация с дискретной скоростью.....	468
9.4.3.	Среднее заданное значение коэффициента ошибок BER ...	469
9.5.	Адаптивные методы при сочетании быстрых и медленных замираний.....	474
	Задачи.....	476
Литература	481

Глава 10

Многоэлементные антенны и пространственно-временные методы передачи	484
10.1.	Модель узкополосного канала ММО	485
10.2.	Параллельное разложение канала ММО.....	487
10.3.	Пропускная способность канала ММО	490
10.3.1.	Статические каналы.....	490
10.3.2.	Каналы с замираниями	496
10.4.	Выигрыш от разнесения в системах ММО: формирование диаграммы направленности антенны	503
10.5.	Компромиссы между разнесенным приемом и мультиплексированием.....	505
10.6.	Пространственно-временная модуляция и кодирование.....	507
10.6.1.	Детектирование по максимуму правдоподобия и вероятность парной ошибки.....	508
10.6.2.	Критерии ранга и определителя.....	510
10.6.3.	Пространственно-временные решетчатые и блочные коды ...	510
10.6.4.	Пространственное мультиплексирование и архитектуры BLAST	511
10.7.	Каналы ММО с частотно-селективными замираниями	515
10.8.	Умные антенны.....	516
	Задачи.....	518
Литература	522

Глава 11

Выравнивание — коррекция каналов	527
11.1.	Повышение корректором шума	528
11.2.	Типы выравнивателей.....	530
11.3.	Сжатый спектр и условия передачи без межсимвольных искажений ISI.....	532
11.4.	Линейные корректоры	536

11.4.1.	Фильтры с обращением в нуль незначущих коэффициентов (ZF).....	537
11.4.2.	Корректоры с минимальной среднеквадратичной ошибкой (MMSE)	539
11.5.	Максимально правдоподобная оценка последовательности	543
11.6.	Выравнивание с решающей обратной связью	545
11.7.	Другие методы выравнивания канала	547
11.8.	Адаптивные фильтры: настройка и слежение	548
	Задачи.....	552
	Литература	558
	Глава 12	
	Модуляция на нескольких несущих.....	560
12.1.	Передача информации с использованием нескольких несущих .	562
12.2.	Модуляция на нескольких несущих с перекрывающимися подканалами	566
12.3.	Ослабление замираний поднесущей	569
12.3.1.	Кодирование с чередованием по времени и частоте	570
12.3.2.	Коррекция частоты	570
12.3.3.	Предварительное кодирование	571
12.3.4.	Адаптивная нагрузка.....	571
12.4.	Дискретная реализация модуляции на нескольких несущих	573
12.4.1.	ДПФ и его свойства	573
12.4.2.	Циклический префикс	575
12.4.3.	Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов — ортогональное ЧРК–ОЧРК	577
12.4.4.	Матричное представление ОЧРК	580
12.4.5.	Векторное кодирование.....	583
12.5.	Проблемы систем с несколькими несущими.....	587
12.5.1.	Отношение пиковой и средней мощностей	587
12.5.2.	Частотный и временной сдвиг	589
12.6.	Рассмотрение конкретного случая: стандарт локальных беспроводных сетей IEEE 802.11a	591
	Задачи.....	593
	Литература	597

Глава 13

Широкополосные системы передачи	600
13.1. Принципы широкополосной передачи	600
13.2. Метод расширения спектра прямой последовательностью — DSSS	609
13.2.1. Модель системы DSSS	609
13.2.2. Расширяющие коды для подавления межсимвольных по- мех ISI: случайные, псевдослучайные и m -последователь- ности	615
13.2.3. Синхронизация	620
13.2.4. Приемники RAKE	624
13.3. Расширение спектра методом скачкообразной перестройки частоты (FHSS)	627
13.4. Многопользовательские многоканальные системы с модуля- цией прямой последовательностью DSSS	630
13.4.1. Расширяющие коды в многопользовательской DSSS	632
13.4.2. Нисходящие каналы	637
13.4.3. Каналы восходящего направления	644
13.4.4. Многоканальное детектирование	650
13.4.5. Многочастотная МДКР (CDMA) — MC-CDMA	655
13.5. Многопользовательская — многоканальная система с расши- рением спектра методом частотного скачка FHSS	658
Задачи	659
Литература	667

Глава 14

Многопользовательские многоканальные системы	670
14.1. Групповые (многопользовательские) каналы радиодоступа: восходящий и нисходящий каналы	671
14.2. Многостанционный доступ	673
14.2.1. Многостанционный доступ с частотным разделением — МДЧР (FDMA)	675
14.2.2. Многостанционный доступ с временным разделением — МДВР (TDMA)	677
14.2.3. Многостанционный доступ с кодовым разделением — МДКР (CDMA)	679
14.2.4. Многостанционный доступ с пространственным разделе- нием — МДПР (SDMA)	681
14.2.5. Гибридные методы	682
14.3. Случайный доступ	683

14.3.1.	Простой алгоритм ALOHA	686
14.3.2.	Синхронизированный алгоритм ALOHA	688
14.3.3.	Многостанционный доступ с контролем несущей — CSMA ..	689
14.3.4.	Планирование	691
14.4.	Регулирование мощности	692
14.5.	Пропускная способность нисходящего (вещательного) канала.....	696
14.5.1.	Модель канала.....	697
14.5.2.	Пропускная способность канала с аддитивным белым шумом AWGN	699
14.5.3.	Общие данные	707
14.5.4.	Пропускная способность при замираниях	710
14.5.5.	Пропускная способность многоэлементных антенн	718
14.6.	Пропускная способность канала восходящего направления (многостанционный доступ)	721
14.6.1.	Пропускная способность канала с аддитивным белым гауссовым шумом AWGN	721
14.6.2.	Емкость канала при замираниях	726
14.6.3.	Емкость каналов с многоэлементными антеннами.....	729
14.7.	Двойственность восходящего и нисходящего направлений канала связи	730
14.8.	Разнесение каналов многих пользователей	736
14.9.	Многопользовательские системы MIMO	740
	Задачи	742
	Литература	747

Глава 15

	Сотовые системы и беспроводные сети с базовой инфраструктурой	752
15.1.	Основы сотовых систем	753
15.2.	Повторное использование каналов	757
15.3.	Емкость соты и отношение сигнал–помеха	763
15.3.1.	Ортогональные системы МДВР (TDMA) и МДЧР (FDMA) ..	765
15.3.2.	Неортогональные системы МДКР (CDMA)	768
15.4.	Методы снижения помех	771
15.5.	Динамическое распределение ресурсов	774
15.5.1.	Планирование	774
15.5.2.	Динамическое распределение каналов.....	775
15.5.3.	Регулирование мощности	777
15.6.	Основополагающие ограничения скорости	780
15.6.1.	Пропускная способность Шеннона в сотовых сетях.....	780

15.6.2. Эффективность использования спектральной области.....	782
Задачи.....	786
Литература	790
Глава 16	
Специализированные беспроводные сети.....	795
16.1. Приложения.....	796
16.1.1. Сети передачи данных.....	797
16.1.2. Сети зданий.....	799
16.1.3. Сети устройств.....	800
16.1.4. Сети датчиков.....	800
16.1.5. Распределенные системы управления.....	802
16.2. Принципы разработки и трудности.....	803
16.3. Уровни протоколов.....	806
16.3.1. Разработка физического слоя.....	808
16.3.2. Разработка уровня доступа.....	810
16.3.3. Разработка сетевого уровня.....	813
16.3.4. Разработка транспортного уровня.....	822
16.3.5. Разработка прикладного уровня.....	823
16.4. Межуровневое проектирование.....	825
16.5. Предельная пропускная способность сети.....	829
16.6. Сети с ограничениями по энергопотреблению.....	832
16.6.1. Модуляция и кодирование.....	833
16.6.2. Системы ММО и ММО с взаимодействием.....	835
16.6.3. Доступ, маршрутизация и режим ожидания.....	836
16.6.4. Межуровневое проектирование в условиях ограниченного энергоснабжения.....	838
16.6.5. Пропускная способность на единицу энергии.....	839
Задачи.....	841
Литература	844
Приложение А	
Представление полосовых сигналов и каналов.....	851
Приложение Б	
Теория вероятностей, случайные величины и случайные процессы.....	856
Б.1. Теория вероятностей.....	856
Б.2. Случайные величины.....	857
Б.3. Случайные процессы.....	864

Б.4. Гауссовские процессы	869
Литература	870
Приложение В	
Матрицы: определения, операции и свойства	871
В.1. Матрицы и векторы	871
В.2. Операции с матрицами и векторами	873
В.3. Разложение матриц	877
Литература	879
Приложение Г	
Обзор стандартов беспроводной связи	880
Г.1. Стандарты сотовой телефонии	880
Г.1.1. Аналоговые системы первого поколения	880
Г.1.2. Цифровые системы второго поколения	882
Г.1.3. Эволюция систем второго поколения	885
Г.1.4. Системы третьего поколения	887
Г.2. Беспроводные локальные сети	889
Г.3. Стандарты беспроводных сетей ближней связи	891
Литература	894
Предметный указатель	895

Предисловие

Беспроводная связь — это обширная и динамично развивающаяся область, которая за последние десятилетия вызвала широкий научный резонанс и дала толчок многим техническим достижениям. Цель данной книги — сформировать у читателя комплексное понимание фундаментальных принципов, лежащих в основе беспроводной связи. К этим принципам относятся ограничения, накладываемые на характеристики и показатели качества беспроводных систем, методы и математический аппарат, необходимые для анализа таких систем, а также технические детали и компромиссы, связанные с их разработкой. Чтобы обосновать эти фундаментальные принципы и подтвердить их примерами, в книге рассматриваются существующие и будущие беспроводные системы. Книга может использоваться в качестве учебника для студентов старших и выпускных курсов высших учебных заведений или технического руководства для инженеров, научных сотрудников академического и прикладного направлений, работающих в области беспроводной связи.

Структура книги

Изложение материала начинается с обзора беспроводной связи в гл. 1. Это история становления беспроводных систем, перспективы их дальнейшего развития, а также обзор существующих систем и стандартов. Главы 2 и 3 посвящены характеристикам беспроводных каналов, с которыми связаны многие проблемы, возникающие при разработке систем. Так, в гл. 2 рассматриваются потери на трассе распространения радиоволн и экранирование в беспроводных каналах, которые проявляются на относительно больших расстояниях. В гл. 3 дана характеристика амплитудных и частотно-селективных замираний, возникших при многолучевом распространении, которые проявляются на значительно меньших расстояниях — порядка длины волны сигнала. В гл. 4 рассматриваются фундаментальные ограничения пропускной способности беспроводных каналов и методы передачи, обеспечивающие эту пропускную способность. Хотя эти методы достаточно сложны и вносят задержки, они помогают понять и обосновать большинство практических схем, рассматриваемых в последующих разделах. В гл. 5 и 6 речь идет о методах цифровой модуляции и их характеристиках в беспроводных каналах. В этих главах показано, что замирания могут существенно ухудшить качество передачи. Поэтому в беспроводных системах с высоким качеством связи требуется применение специальных методов ослабления замираний.

Несколько следующих глав посвящены основным методам ослабления амплитудных и частотно-селективных замираний. Так, в гл. 7 рассмотрены принципы, лежащие в основе методов разнесения, в том числе и новый математический аппарат, который значительно упрощает анализ характеристик. Эти методы позволяют устранить большинство вредных воздействий при амплитудных замираниях. В гл. 8 подробно рассматриваются методы кодирования, включая как традиционные методы блочного, сверточного и решетчатого кодирования, так и последние разработки в области каскадных кодов, турбо-кодов и кодов LDPC. В этой главе показано, что хотя методы кодирования в каналах с помехами имеют характеристики, близкие к оптимальным, все же остается еще множество нерешенных проблем, связанных с разработкой и анализом характеристик кодов для беспроводных систем. В гл. 9 рассматривается адаптивная модуляция при амплитудных замираниях, которая обеспечивает надежную связь и эффективное использование спектра, учитывая нестационарность беспроводного канала. Кроме того, в этой главе методы и характеристики адаптивной модуляции увязаны с фундаментальными границами пропускной способности в каналах с замираниями. 10 гл. посвящена многоэлементным антеннам и пространственно-временным системам связи: дополнительное пространственное измерение обеспечивает высокие скорости передачи и устойчивость к замираниям. В гл. 11 рассматриваются методы коррекции, применяемые при обработке сигнала в приемнике при компенсации частотно-селективных замираний. Модуляция на нескольких несущих, описанная в гл. 12, представляет более простой и гибкий, по сравнению с коррекцией, способ ослабления частотно-селективных замираний. В гл. 13 описаны методы расширения спектра одного или нескольких абонентов. Эти методы не только ослабляют частотно-селективные замирания, но и позволяют нескольким абонентам совместно использовать один и тот же спектр частот.

Три последние главы книги посвящены многопользовательским системам и сетям. В 14 гл. рассматриваются методы многостанционного и случайного доступа, обеспечивающие совместное использование беспроводного канала множеством абонентов с непрерывной или пульсирующей нагрузкой. В этой же главе описан механизм контроля мощности, позволяющий уменьшить помехи между абонентами и в то же время гарантировать всем абонентам требуемые показатели качества. Глава завершается обсуждением фундаментальных границ пропускной способности в многопользовательских каналах, а также методов передачи и совместного использования каналов, позволяющих достичь границ этой пропускной способности. 15 гл. посвящена вопросам разработки, оптимизации и анализа характеристик систем сотовой связи, включая актуальные проблемы



контроля мощности и фундаментальные ограничения на эти системы. В последней, 16 гл., обсуждаются базовые принципы специализированных беспроводных сетей и актуальные исследовательские вопросы, связанные с такими сетями.

Необходимая база

Единственным необходимым условием для понимания материала данной книги являются базовые знания по теории вероятностей и случайных процессов, а также знания в области анализа систем и сигналов методами Фурье. Знание цифровой связи полезно, но не обязательно, так как основные понятия из этой области освещены в книге. Базовый материал, используемый в различных главах книги, изложен в трех приложениях. Так, в приложении А описано эквивалентное низкочастотное представление полосовых сигналов и систем, которое упрощает анализ полосовых систем. В приложении Б дается обзор основных понятий теории вероятностей и случайных процессов, используемых в книге. В приложении В рассмотрены определения, операции и свойства матриц, которые широко применяются в гл. 10 и 12. Приложение Г обобщает основные параметры существующих беспроводных систем и стандартов.

Особенности книги

Огромный объем исследовательских работ в области беспроводной связи и сложность разработки беспроводных систем сделали невозможным всестороннее рассмотрение всех вопросов, затрагиваемых в данной книге. Поэтому каждая глава содержит обширный перечень других источников, которые дополняют и развивают изложенный материал. Также в книге имеется около сотни решенных примеров, иллюстрирующих и подчеркивающих основные принципы и компромиссы. Кроме того, книга содержит около 300 задач для самостоятельного решения. Эти задачи, относящиеся к нескольким категориям, составлены таким образом, чтобы повторить и закрепить материал книги. Некоторые задачи призваны проиллюстрировать на примерах или пояснить более подробно основные рассмотренные принципы, а также получить или проиллюстрировать свойства беспроводных систем, использующих эти принципы. Задачи использованы также для доказательства результатов, которые в тексте были сформулированы без доказательства. Другая категория задач направлена на получение численных результатов, которые дают представление о рабочих

параметрах и показателях качества беспроводных систем в типичных условиях. В задачах также представлены новые понятия и аспекты проектирования систем, которые не нашли отражения в тексте. Все задачи снабжены указаниями по решению.

Как использовать эту книгу для формирования курса лекций

Книга построена так, чтобы обеспечить максимальную гибкость при использовании ее в качестве учебника в зависимости от желаемой продолжительности курса, базовой подготовки студентов и направленности курса. Основу книги составляют главы с 1 по 6. В каждой из последующих глав рассматривается отдельная тема, которая может быть опущена или включена в другие курсы. Предпосылками, необходимыми для использования данной книги в качестве основы для курса лекций, являются базовые университетские курсы по теории сигналов и систем (как аналоговых, так и цифровых), а также по теории вероятностей и случайных процессов. Полезно, но не обязательно, знание основ цифровой связи, в этом случае материал 5 гл. (а также связанный с ним материал других глав) можно дать в виде краткого обзора.

Материал книги естественно распадается на три сегмента: основа (1–6 гл.), построение однопользовательских беспроводных систем (7–13 гл.) и многопользовательские беспроводные сети (14–16 гл.). Большая часть материала книги может быть изложена на протяжении двух-трех четвертей или двух семестров. Если курс длится три четверти, то при его построении следуют естественному разбиению материала книги на главы, в конце курса возможна углубленная проработка исследовательского проекта. Если курс рассчитан на два семестра или две четверти, то первую его часть можно построить на основе 1–10 гл. (однопользовательские системы с амплитудными замираниями), а вторую часть — на основе 11–16 гл. (методы ослабления частотно-селективных замираний, многопользовательские системы и беспроводные сети). Если длительность курса составляет одну четверть или один семестр, в его основу могут быть положены однопользовательские беспроводные системы на базе материала 1–6 гл. и отдельных вопросов из 7–13 гл. В этом случае вторую (необязательную) четверть или семестр можно посвятить рассмотрению многопользовательских систем и беспроводных сетей (часть 13 гл. и 14–16 гл.). Я использую такое разбиение в Стэнфорде, где курс рассчитан на две четверти, при этом вторая четверть предусматривается спустя год и посвящается изучению дополнительной литературы и углубленной проработке исследовательского проекта. Альтернативный вариант — это курс

длительностью в одну четверть или один семестр, рассматривающий как однопользовательские, так и многопользовательские системы на основе глав 1–6 и 13–16, а также некоторые дополнительные вопросы из 7–12 гл., если позволяет время.

На партнерском сайте в Интернете¹ можно найти вспомогательные материалы по данной книге, включая слайды лекций, дополнительные задачи и список печаток.

Благодарности

Написать книгу нелегко, и я глубоко признательна многим людям за их помощь на различных стадиях работы над этим проектом. Прежде всего, хочется поблагодарить десять поколений студентов Калифорнийского технологического института и Стэнфордского университета, испытавших на себе ежегодные доработки моего курса по беспроводной связи: их советы, точки зрения и впечатления были очень ценными при выборе вопросов для рассмотрения и стиля изложения книги. Джон Проукис (John Proakis) и несколько анонимных рецензентов дали ценные и глубокие замечания и советы по ранним версиям рукописи, указав на недоработки и слабые места, что позволило значительно улучшить окончательный текст. Мои сегодняшние аспиранты Раджив Агравал (Rajiv Agrawal), Шугуань Чиу (Chuguang Cui), Ифан Линь (Yifan Liang), Ксяньен Лиу (Xianheng Liu), Крис Нг (Chris Ng) и Тисянь Ю (Taesang Yoo) тщательно вычитывали рукописи многих глав, предлагая новые ракурсы и подходы, проверяя вывод формул, отыскивая опечатки и отмечая мои ошибки и недоработки. Мои бывшие аспиранты Тим Холидей (Tim Holliday), Саид Джафар (Syed Jafar), Нихар Джиндал (Nihar Jindal), Нилех Мехта (Neelesh Mehta), Ставрос Таумпис (Stavros Toumpis) и Шрирам Вишванат (Sriram Vishwanath) внимательно изучили по одной или более глав и внесли ценный вклад. Кроме того, все мои нынешние и бывшие студенты (уже упомянутые, а также Мохаммед-Слим Алауни (Mohamed-Slim Alouini), Сун-Цзи Чуа (Soon-Ghee Chua), Лифан Ли (Lifang Li) и Кевин Ю (Kevin Yu)) дополнили содержание книги своими научными результатами, особенно в гл. 4, 7, 9, 10, 14 и 16. Руководство по решению задач было разработано Радживом Агравалом (Rajiv Agrawal), Грейс Чжао (Grace Gao) и Анкитом Кумаром (Ankit Kumar). Я также признательна многим своим коллегам, которые, несмотря на занятость, по первому зову находили время, чтобы прочитать и обсудить отдельные главы. Они были очень

¹<http://www.cambridge.org/9780521837163>

добры, великодушны и честны в своих оценках и критике. Их глубокие и ценные замечания не только значительно улучшили книгу, но и дали мне возможность узнать много нового о беспроводной связи. За это я очень благодарна Джефу Эндрюсу (Jeff Andrews), Тони Эфремидесу (Tony Ephremides), Майку Фитцу (Mike Fitz), Денису Гейкелю (Dennis Goeckel), Ларри Гринштейну (Larry Greenstein), Ральфу Киттеру (Ralf Koetter), П.Р. Кумар (P.R. Kumar), Мьюриэл Медар (Muriel Médard), Ларри Мильштейну (Larry Milstein), Серджио Серветто (Sergio Servetto), Серджио Верду (Sergio Verdú) и Рою Етсу (Roy Yates). Дон Кокс всегда был готов поделиться своими огромными инженерными знаниями и посвятить меня во многие тонкости и допущения, касающиеся беспроводных систем. Я также благодарна многим сотрудникам, с которыми проработала много лет, а также коллегам по совместной работе в компаниях Maxim Technologies и AT&T Bell Laboratories, которые обогатили мои знания в области беспроводной связи и смежных областях.

Я признательна преподавателям, студентам и руководству Стэнфордского университета за создание динамичной, стимулирующей и захватывающей среды для научной и преподавательской работы, в которой и появилась данная книга. Я также благодарна Управлению военно-морских исследований США (ONR²) и Национальному научному фонду США (NSF³) за финансовую поддержку в течение всего времени написания книги. Огромной благодарности заслуживают также мои помощники по административной работе Джойс ДеБолт (Joice DeBolt) и Пэт Оширо (Pat Oshiro), которые взяли на себя все большие и малые заботы по поддержке моих исследований и преподавательской работы. Также хочу поблагодарить корректора Мэтта Дернала (Matt Darnel) за его мастерство и внимание к деталям в процессе выпуска книги. Мой редактор Фил Мейлер (Phil Meyler) сопровождал эту книгу с самого начала и до сегодняшнего дня — на протяжении десяти лет. Его поддержка и энтузиазм никогда не ослабевали, а все мои изменения и задержки он воспринимал вежливо и благодушно. Я не могу представить лучшего редактора, с которым можно было бы начать такое сложное, изнурительное и полезное дело.

Мне хочется выразить особую благодарность двум людям за поддержку данного проекта с самого начала и за все мои профессиональные достижения. Ларри Гринштейн (Larry Greenstein), благодаря своему глубокому пониманию темы и исследовательскому опыту, первым пробудил во мне интерес к беспроводной связи. Он стал для меня замечательным источником знаний, наставником и другом. Правин Варэя (Pravin Varaiya)

²ONR — Office of Naval Research.

³NSF — National Science Foundation.



оказал на меня сильное влияние как научный руководитель — благодаря своим обширным и глубоким знаниям в сочетании с удивительной строгостью, проницательностью и стремлением к совершенству. Я благодарна ему за постоянную поддержку, вдохновение и дружбу.

Мои друзья и семья очень помогли мне своей любовью и ободрением, за что я им глубоко признательна. Благодарю их за то, что не отвернулись от меня, невзирая на мои долгие отсутствия на заключительном этапе работы над рукописью, а также за поддержку, без которой эта книга не могла бы быть закончена. Особо хочу поблагодарить Реми (Remy), Пенни (Pennу) и Лили (Lili) за любовь и поддержку, а также мою мать Эдриен (Adrienne) за ее любовь и за то, что она передала мне свои творческие способности и склонность к сочинительству. Мой отец Вернер (Werner) оказал очень сильное (как прямое, так и косвенное) влияние на эту книгу и всю мою карьеру. Это был старший профессор Голдсмит (Goldsmith), успешный исследователь, автор и первопроходец во многих областях механики и биомеханики. Советы отца заняться техникой дали направление моей карьере, в которой он был моей главной «группой поддержки». Его гордость, любовь и поддержка были для меня постоянным источником вдохновения. Мне посчастливилось помогать отцу в работе над его последней статьей, и в этой книге я пыталась наследовать его строгость, внимание к деталям и волнение по поводу опечаток, которые наблюдала во время нашей совместной работы.

И наконец, у меня не хватит слов, чтобы выразить свою признательность и любовь моему мужу Артуро (Arturo) и детям Даниэль (Daniel) и Николь (Nicole). Артуро всегда оказывал огромную поддержку, как при написании этой книги, так и во всех других аспектах моей карьеры, ради которой он пошел на многие жертвы. Его гордость, любовь, ободрение и преданность ведут меня сквозь взлеты и падения университетской и семейной жизни. Это лучший муж, отец и друг, о котором я могла мечтать, и все, что он делает, обогащает мою жизнь. Даниэль и Николь, как лучики солнца, освещают мой мир — благодаря их любви и очарованию каждый день становится для меня светлее. Я счастлива, что могу разделить свою жизнь с этими тремя самыми важными для меня людьми. Эта книга посвящена им.

Сокращения

3GPP	Объединение по разработке стандартов мобильной связи третьего поколения
ACK	Подтверждение приема пакета
ACL	Асинхронный режим передачи, без установления соединения
AFD	Средняя продолжительность замирания сигнала
AFRD	Средняя протяженность зоны замираний
AGC	Автоматическое регулирование усиления
AMPS	Усовершенствованная мобильная телефонная система ¹
AOA	Угол падения (входа) радиолуча
AODV	Протокол специализированной маршрутизации по запросу с вектором перемещения
APP	Апостериорная вероятность
ARQ	Автоматический запрос на повтор передачи (протокол)
ASE	Эффективность использования спектра (сот)
AWGN	Аддитивный белый гауссов шум
BC	Радиовещательный канал
BCH	Боуза – Чоудхури – Хоквенгема, код БХЧ
BER	Коэффициент ошибок (по битам)
BICM	Кодовая модуляция с чередованием бит
BLAST	Метод передачи на одной частоте, использующий несколько антенн на телефоне и на базовой станции
BPSK	Двоичная фазовая манипуляция (ДФМН, ФМ2)
BS	Базовая станция (точка беспроводного доступа)
ССК	Манипуляция с дополнительным кодом
CD	Кодовое разделение
CDF	Кумулятивная функция распределения
CDI	Информация о распределении каналов
CDMA	Многостанционный (или коллективный) доступ с кодовым разделением каналов
CDPD	Сотовая цифровая система пакетной передачи данных
CLT	Центральная предельная теорема
COVQ	Квантизатор векторной оптимизации каналов
CPFSK	Частотная манипуляция с непрерывной фазой ЧМН-НФ
CSI	Дополнительная информация о канале
CSIR	Дополнительная информация о канале на приеме

¹В литературе встречается также другая расшифровка AMPS (American Mobile Phone System) — Американская система мобильной связи. — *Прим. перев.*

CSIT	Дополнительная информация о канале на передаче
CSMA	Многостанционный (коллективный) доступ с опросом несущей
CTS	Готовность к приему
DARPA	Агентство перспективных исследований МО США
D-BLAST	Диагональный BLAST
DCA	Динамическое распределение каналов
DCS	Цифровая сотовая система
DECT	Усовершенствованная цифровая беспроводная связь (общеевропейский стандарт) ²
DFE	Выравнивание с решающей обратной связью
DFT	Дискретное преобразование Фурье, ДПФ
D-MPSK	Относительная (дифференциальная) многоуровневая ФМН
DPC	Метод кодирования «грязных» — погашенных страниц документов
DPSK	Относительная двоичная фазовая манипуляция ФМН
D-QPSK	Относительная квадратурная фазовая манипуляция ОФМ-4
DS	Прямая последовательность
DSDV	Вектор последовательной маршрутизации (назначения интервалов маршрута)
DSL	Цифровая абонентская линия
DSR	Динамичная маршрутизация источника
DSSS	Расширение спектра методом прямой последовательности
EDGE	Усовершенствованная система передачи данных в GSM
EGC	Линейное сложение сигналов
ETACS	Европейская система мобильной связи общего доступа
ETSI	Европейский Институт телекоммуникационных стандартов
EURO-COST	Европейское общество научно-технических исследований
FAF	Коэффициент затухания на этаж
FCC	Федеральная комиссия по связи США
FD	Частотное разделение
FDD	Дуплексная передача с частотным разделением направлений
FDMA	Многостанционный доступ с частотным разделением (МДЧР)

²В литературе встречается также другая расшифровка DECT (Digital European Cordless Telecommunications) — Европейская цифровая беспроводная связь — *Прим. перев.*

FFH	Быстрая скачкообразная перестройка частоты
FFT	Быстрое преобразование Фурье, БПФ
FHSS	Расширение спектра методом скачкообразной перестройки частоты
FIR	Конечная импульсная характеристика, КИХ
FSK	Частотная манипуляция
FSMC	Канал Маркова с конечным числом состояний
GEO	Геосинхронная орбита
GFSK	Частотная манипуляция Гаусса
GMSK	Манипуляция Гаусса с минимальным сдвигом (ГЧМН-МС)
GPRS	Общая служба передачи пакетов в радиосети
GRT	Общая схема построения трасс прохождения радиолучей (трассировка)
GSM	Глобальная система мобильной связи
GTD	Геометрическая теория дифракции
HDD	Декодирование с жестким алгоритмом принятия решения
HDR	Высокоскоростная передача данных
HDSL	Высокоскоростная цифровая абонентская линия
HIPERLAN	Высокоэффективная местная радиосеть ³
HSCSD	Высокоскоростная система связи с коммутацией каналов
HSDPA	Высокоскоростной доступ с коммутацией пакетов
ICI	Взаимные влияния между несущими
IDFT	Обратное ДПФ
IEEE	Институт инженеров по электронике и электротехнике
IFFT	Обратное БПФ
i.i.d.	Независимые и одинаково распределенные случайные (величины)
IR	Бесконечная импульсная характеристика, БИХ
IMT	Международная система мобильной телефонии
IP	Интернет-протокол (IP-протокол)
ISI	Межсимвольная интерференция; межсимвольные помехи
ISM	Диапазон частот, выделенный для общественных, промышленных, научных и медицинских целей
ITU	Международный Союз Электросвязи, МСЭ
JTACS	Японская система TACS
LAN	Локальная (вычислительная) сеть, ЛВС
LDPC	Контроль четности с низкой плотностью
LEO	Низкая околоземная орбита

³Европейский стандарт беспроводных ЛВС.

LLR	Логарифмические критерии правдоподобия
LMA	Среднее локальное затухание
LMDS	Местная многоточечная распределенная служба связи
LMS	Минимальное среднеквадратическое
LOS	Линия прямой видимости
MAC	Канал многостанционного доступа
MAI	Помехи (взаимные) многостанционного доступа
MAN	Городская (вычислительная) сеть
MAP	Максимум априорной (вероятности)
MC-CDMA	CDMA на нескольких несущих
MDC	Кодирование по множеству признаков
MEO	Орбита средней удаленности от Земли
MFSK	M-кратная частотная манипуляция
MGF	Производящая функция моментов
MIMO	Множество входов/множество выходов
MISO	Множество входов/один выход
ML	Максимальное правдоподобие
MLSE	Оценка максимального правдоподобия последовательности
MMDS	Многоканальная многоточечная распределенная служба связи
MMSE	Минимальная среднеквадратичная ошибка
MPAM	M-кратная амплитудно-импульсная модуляция
MPSK	M-кратная фазовая манипуляция
MQAM	M-кратная квадратурная амплитудная модуляция
MRC	Суммирование с дифференциальным взвешиванием сигналов
MSE	Среднеквадратичная ошибка (СКО)
MSK	Манипуляция с минимальным сдвигом
MTSO	АТС мобильной связи (АТС МС)
MUD	Многопользовательский детектор
N-AMPS	Узкополосная система AMPS
NMT	Северная мобильная телефонная система
OFDM	Ортогональное мультиплексирование с частотным разделением (ОЧРК)
OFDMA	Многостанционный доступ с OFDM (ОЧРК)
O-QPSK	Квадратурная фазовая манипуляция с фазовым сдвигом (ФМ4С)
OSI	Взаимодействие открытых систем, ВОС
OSM	Бюро управления частотным диапазоном
PACS	Система связи персонального доступа
PAF	Распределенный коэффициент затухания

PAM	Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)
PAR	Отношение максимальной мощности к средней (пик-фактор)
PBX	Учрежденческая АТС (УАТС)
PCS	Система персональной связи
PDA	Электронный секретарь
PDC	Персональная цифровая сотовая связь (стандарт)
pdf	Плотность распределения (вероятности)
PER	Коэффициент пакетов с ошибками
PHS	Система персональной мобильной телефонии
PLL	Цепь фазовой автоподстройки частоты, ФАПЧ
PN	Псевдослучайный (псевдошумовой)
PRMA	Многостанционный доступ с резервированием пакетов
PSD	Спектральная плотность мощности
PSK	Фазовая манипуляция ФМН
PSTN	Телефонная сеть общего пользования, ТФОП
QAM	Квадратурная амплитудная модуляция
QoS	Качество услуг
QPSK	Квадратурная фазовая манипуляция, КФМН
RCPC	Совместимые по скорости пунктирные сверточные коды
RCS	Эффективная площадь отражения цели
RLS	Наименьшее квадратичное значение
rms	Среднеквадратичное значение (СКЗ)
RS	Код Рида – Соломона
RTS	Запрос на передачу пакета
RTT	Технология радиопередачи
SBS	Посимвольно
SC	Избирательное объединение
SCO	Синхронный, ориентированный на соединение
SDD	Декодирование с мягким алгоритмом принятия решения
SDMA	Многостанционный (коллективный) доступ с пространственным разделением каналов
SE	Оценка последовательности (символов)
SFH	Медленное скачкообразное переключение частоты
SHO	Плавная, «мягкая» передача обслуживания
SICM	Кодовая модуляция с чередованием символов
SIMO	Один вход/множество выходов
SINR	Отношение мощности сигнала к мощности взаимных помех и шума
SIR	Отношение мощности сигнала к мощности помехи
SISO	Один вход/один выход

SNR	Отношение мощности сигнала к мощности шума (защищенность)
SSC	Объединение с переключением и остановкой
SSMA	Многостанционный доступ с расширением спектра
STBC	Пространственно-временные блочные коды
STTC	Пространственно-временные решетчатые коды
SVD	Разложение по сингулярным числам матрицы
TACS	Система мобильной связи общего доступа
TCP	Протокол управления передачей
TD	Временное разделение сигналов
TDD	Дуплексная передача с временным разделением направлений
TDMA	Многостанционный доступ с временным разделением (каналов)
TIA	Ассоциация промышленности средств связи (США)
UEP	Коды с неравномерной защитой от ошибок
UMTS	Универсальная система мобильной связи
U-NII	Нелицензионная национальная информационная инфраструктура
US	Некоррелированное рассеяние
UWB	Сверхширокополосная радиосвязь
V-BLAST	Вертикальный BLAST
VC	Векторное кодирование
VCO	Генератор, управляемый напряжением, ГУН
VQ	Векторный квантователь
WAN	Глобальная сеть (соединяет географически разделенные сети)
W-CDMA	Широкополосный МДКР (CDMA)
WLAN	Беспроводная локальная сеть, беспроводная ЛВС
WPAN	Беспроводные персональные сети
WSS	Стационарный в широком смысле (процесс)
ZF	Обращение в нуль (незначущих коэффициентов)
ZMCSCQ	Комплексная гауссова величина с нулевым средним и круговой симметрией
ZMSW	Пространственная модель белого шума с нулевым средним
ZRP	Зоновый протокол маршрутизации

Обозначения

\approx	Приблизительно равно
\triangleq	Равный по определению ($a \triangleq b$: a по определению b)
\gg	Намного больше
\ll	Намного меньше
\cdot	Оператор умножения
$*$	Оператор свертки
\otimes	Оператор круговой свертки
\otimes	Оператор кронекеровского произведения
$\sqrt[n]{x}, x^{1/n}$	Корень n -й степени из x
$\arg \max[f(x)]$	Значение x , при котором функция максимальна
$\arg \min[f(x)]$	Значение x , при котором функция минимальна
$\text{Co}(W)$	Выпуклая оболочка сферы W
$\delta(x)$	дельта-функция
$\text{erfc}(x)$	Дополнительная функция ошибок
$\exp[x]$	e^x
$\text{Im}\{x\}$	Мнимая часть (комплексного числа) x
$I_0(x)$	Модифицированная функция Бесселя 0-го порядка
$J_0(x)$	Функция Бесселя 0-го порядка
$L(x)$	Преобразование Лапласа по x
$\ln(x)$	Натуральный логарифм x
$\log_x(y)$	Логарифм y по основанию x
$\log_x \det[\mathbf{A}]$	Логарифм определителя (детерминанта) матрицы \mathbf{A} по основанию x
$\max_x f(x)$	Значение $f(x)$ максимизированное для всех x
$\text{mod}_n(x)$	x по модулю n
$N(\mu, \sigma^2)$	Гауссово (нормальное) распределение со средним μ и дисперсией σ^2
\bar{P}_r	среднее значение полученной энергии (мощности) в данной точке
$Q(x)$	Q -функция Гаусса
\mathbb{R}	Область всех вещественных чисел
$\text{Re}\{x\}$	Действительная часть (комплексного числа)
$\text{rect}(x)$	Прямоугольная функция ($\text{rect}(x) = 1$ для $ x \leq 0,5$ и 0 для остальных значений)

$\text{sinc}(x)$	Синс-функция ($\text{sinc } x = \sin \pi x / \pi x$)
$\mathbf{E}[\cdot]$	Оператор математического ожидания
$\mathbf{E}[\cdot \cdot]$	Оператор условного математического ожидания
\bar{X}	Ожидаемое (среднее) значение случайной переменной X
$X \sim \rho_X(x)$	Случайная переменная X имеет распределение $\rho_X(x)$
$\text{Var}[X]$	Дисперсия случайной переменной X
$\text{Cov}[X, Y]$	Ковариация случайных переменных X и Y
$H(X)$	Энтропия случайной переменной X
$H(Y/X)$	Условная энтропия случайной переменной Y при условии случайной переменной X
$I(X; Y)$	Взаимная информация между случайными переменными X и Y
$M_X(s)$	Производящая функция моментов случайной переменной X
$\varphi_X(s)$	Характеристическая функция случайной переменной X
$\mathcal{F}[\cdot]$	Оператор преобразования Фурье ($\mathcal{F}_x[\cdot]$ — преобразование относительно x)
$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$	Оператор обратного преобразования Фурье ($\mathcal{F}_x^{-1}[\cdot]$ — обратное преобразование относительно x)
$\text{DFT}\{\cdot\}$	Оператор дискретного преобразования Фурье
$\text{IDFT}\{\cdot\}$	Оператор обратного дискретного преобразования Фурье
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	Оператор скалярного произведения
x^*	Комплексно сопряженный величине x
$\angle x$	Фаза x
$ x $	Абсолютная величина (амплитуда) x
$ \chi $	Размер алфавита (первичного кода)
$\lfloor x \rfloor$	Наибольшее целое число, меньшее или равное x
$\lfloor x \rfloor_S$	Наибольшее число в множестве S , меньшее или равное x
$\{x : C\}$	Множество всех значений x , удовлетворяющих условию C
$\{x_i : i = 1, \dots, n\}, \{x_i\}_{i=1}^n$	Множество: x_1, \dots, x_n
$(x_i : i = 1, \dots, n)$	Вектор $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$
$\ \mathbf{x}\ $	Норма вектора \mathbf{x}

$\ \mathbf{A}\ _F$	Норма Фробениуса матрицы \mathbf{A}
\mathbf{x}^*	Комплексно сопряженный вектору \mathbf{x}
\mathbf{x}^H	Эрмитов (сопряженный транспонированный) вектор \mathbf{x}
\mathbf{x}^T	Вектор, транспонированный \mathbf{x}
\mathbf{A}^{-1}	Матрица, обратная \mathbf{A}
\mathbf{A}^H	Эрмитова (сопряженная транспонированная) матрица \mathbf{A}
\mathbf{A}^T	Транспонирование матрицы \mathbf{A}
$\det[\mathbf{A}]$	Определитель матрицы \mathbf{A}
$\text{Tr}[\mathbf{A}]$	Сумма элементов главной диагонали матрицы \mathbf{A}
$\text{vec}(\mathbf{A})$	Вектор, полученный сложением столбцов матрицы \mathbf{A}
$N \times M$ matrix	Матрица с N строками и M столбцами
$\text{diag}[x_1, \dots, x_N]$	Диагональная матрица $N \times N$ с диагональными элементами x_1, \dots, x_N
\mathbf{I}_N	Единичная матрица размером $N \times N$ (N можно опустить, если размер ясен из контекста)

ГЛАВА I

ОБЗОР СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Вне всяких сомнений, беспроводные средства связи сегодня представляют самый быстро развивающийся сегмент отрасли связи. По этой причине они приковали к себе внимание средств массовой информации и общества. Последнее десятилетие охарактеризовалось бурным развитием систем сотовой связи, и в настоящее время по всему миру насчитывается свыше двух миллиардов пользователей таких систем. В самом деле, сотовые телефоны стали важным инструментом бизнеса и частью повседневной жизни в большинстве развитых стран, а во многих развивающихся странах они стремительно вытесняют устаревшие проводные системы. Кроме того, беспроводные локальные сети сегодня часто дополняют или заменяют проводные сети в домашних условиях, на предприятиях и в студенческих городках. Существует и множество новых приложений, включая беспроводные сети датчиков, автоматизированные производственные линии и автомагистрали, «умные дома¹» и бытовые приборы, а также телемедицину, которые проходят путь от научных разработок до реальных систем. Стремительный рост беспроводных систем в сочетании с распространением небольших портативных и карманных компьютеров предсказывает блестящее будущее беспроводным сетям — как в виде автономных систем, так и в качестве составной части большой сетевой инфраструктуры. Впрочем, существует еще много нерешенных проблем, связанных с созданием надежных беспроводных систем, которые обеспечили бы рабочие характеристики, необходимые для поддержки новых приложений. В этой вступительной главе представлен краткий исторический обзор беспроводных систем, начиная от дыма сигнальных костров в доиндустриальную эпоху и заканчивая сотовыми, спутниковыми и другими беспроводными сетями сегодняшнего дня. Затем мы более детально обсудим концепцию беспроводной связи, в том числе технические проблемы, которые ждут своего решения. Будут рассмотрены существующие беспровод-

¹ Дома с централизованным компьютерным управлением всеми системами жизнеобеспечения и подсобными службами: освещением, водоснабжением, отоплением, кондиционированием воздуха и т. п. — *Прим. перев.*

ные системы наряду с вновь появляющимися системами и стандартами. Разрыв между уже существующими и возникающими системами и представление о будущих беспроводных приложениях позволяют оценить, как много еще нужно сделать, чтобы эти новые идеи и представления стали реальностью.

1.1. История беспроводной связи

Первые беспроводные сети появились еще в древности. Эти системы передавали информацию на расстояние прямой видимости (которое потом было увеличено за счет применения телескопов), используя дым сигнальных костров, сигнальные лампы, мерцание зеркал, сигнальные вспышки или сигнальные флажки. Детально разработанный набор сигнальных комбинаций позволял передавать сложные сообщения с помощью этих элементарных сигналов. На вершинах холмов и вдоль дорог были оборудованы наблюдательные пункты, чтобы передавать сообщения по эстафете на большие расстояния. На смену этим первым сетям связи пришли сначала телеграф (изобретенный в 1838 г. Самуэлем Морзе), а позднее — телефон. В 1895 г., спустя несколько десятилетий после изобретения телефона, Маркони продемонстрировал первую радиопередачу с острова Уайт на буксир, находящийся на расстоянии 18 миль, и таким образом родилась радиосвязь. Радиотехнологии стремительно развивались, что позволило вести передачу на большие расстояния с лучшим качеством, меньшей мощностью и с помощью меньших по размеру и стоимости устройств, и в результате появились общественные и частные системы радиосвязи, телевидение и беспроводные сети.

Первые радиосистемы передавали аналоговые сигналы. Сегодня большинство радиосистем передают цифровые двоичные сигналы — биты, непосредственно представляющие поток данных или полученные при преобразовании аналогового сигнала в цифровую форму. При цифровой радиосвязи биты могут передаваться в виде непрерывного потока или группироваться в пакеты. Более поздний вид радиосвязи называется пакетным радио. Такие системы часто характеризуются пульсирующим режимом передачи: радио бездействует за исключением того времени, когда идет передача пакета, хотя оно может передавать пакеты и непрерывно. Первая радиосеть, использующая передачу пакетов, ALOHANET, была разработана в Гавайском Университете в 1971 г. Эта сеть обеспечивала связь между компьютерами вычислительных центров в семи университетских городках, расположенных на четырех островах, и главным вычислительным центром, который находился на острове Оаху. Сетевая архитек-

тура имела топологию «звезда», а в качестве концентратора использовался компьютер главного вычислительного центра. Любые два компьютера могли устанавливать между собой двунаправленные соединения, проходящие через центральный сетевой концентратор. Сеть ALOHANET ввела первый набор протоколов для доступа к каналам и маршрутизации в пакетных радиосистемах, и многие принципы, положенные в основу этих протоколов, используются и по сей день. Американские военные проявили чрезвычайный интерес к этой комбинации пакетной передачи данных и радиовещания. За период с 1970-х до начала 1980-х годов Агентство перспективных исследований МО США DARPA² вложило значительные финансовые средства в развитие сетей пакетной радиопередачи для тактических задач на поле боя. Узлы связи этих специальных беспроводных систем могли самостоятельно конфигурироваться в сеть (или изменять конфигурацию) без помощи какой-либо заранее установленной инфраструктуры. Инвестиции DARPA в специальные сети достигли своего пика в середине 1980-х, но полученные в итоге системы оказались далеко за рамками ожидаемых результатов по скорости передачи и функциональным возможностям. Эти сети продолжали разрабатывать для военных целей. Пакетные радиосети нашли также коммерческое применение в беспроводной передаче данных на большие расстояния. Эти услуги, впервые введенные в начале 1990-х, обеспечивали беспроводной доступ к информации (включая электронную почту, передачу файлов и просмотр веб-страниц) на довольно низких скоростях порядка 20 кбит/с. Но в действительности устойчивый рынок беспроводной передачи данных на большие расстояния так никогда и не сложился, в основном, из-за низкой скорости передачи, высокой стоимости и отсутствия привлекательных применений — «приманок». В основном эти службы исчезли в 1990-е годы, вытесненные потенциальными возможностями таких средств беспроводной передачи данных, как сотовые телефоны и беспроводные локальные вычислительные сети ЛВС.

Появление проводной технологии Ethernet в 1970-х годах увело многие коммерческие компании от технологий радиосетей. Скорость передачи данных в Ethernet на уровне 10 Мбит/с превосходила все существующие методы, основанные на использовании радио, и компании не возражали против прокладки кабелей внутри и между своими зданиями, чтобы

²DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) — орган МО США, выполняющий посреднические функции между этим ведомством и научно-исследовательскими организациями. Занимается координацией ведения НИОКР, в том числе по суперкомпьютерам (программа НРСС), сетям, оборонной компьютерной инициативе и др. проектам. Годовой бюджет — около 2 млрд. долл. В 1973 г. агентство DARPA создало сеть DARPAnet, которая впоследствии дала начало Internet. — *Прим. перев.*

воспользоваться преимуществами таких высоких скоростей. В 1985 г. Федеральная комиссия по связи США FCC³ выделила для коммерческого использования *беспроводными* ЛВС полосу частот, санкционировав ее использование для общественных, промышленных, научных и медицинских целей — ISM⁴. Полоса частот ISM была привлекательной для производителей беспроводных ЛВС, так как им не надо было получать лицензию комиссии по связи FCC для работы в этой полосе частот. Однако беспроводным системам ЛВС не разрешалось пересекаться с первичными пользователями частотных полос ISM, что заставляло их использовать низкий диапазон мощностей и неэффективные схемы сигнализации. Более того, помехи от первичных пользователей в этой частотной полосе были довольно высокими. В результате у этих первых беспроводных ЛВС были очень плохие технические характеристики как по скорости передачи данных, так и по зоне покрытия. Эти невысокие технические характеристики в сочетании с заботой о безопасности, отсутствием стандартов и высокой стоимостью (узел доступа первой беспроводной ЛВС стоил по каталогу 1400 долл., в отличие от нескольких сотен долларов за карту проводного Ethernet) стали причиной плохих продаж. Немногие из таких систем действительно использовались для информационных сетей: они были низведены до уровня несложных приложений типа управления запасами. Нынешнее поколение беспроводных ЛВС, основанное на семействе стандартов IEEE 802.11, обладает лучшими техническими характеристиками, хотя скорость передачи данных все еще остается относительно низкой (максимальная групповая скорость передачи данных составляет десятки Мбит/с), а зона покрытия совсем небольшая — около 100 м. Проводной Ethernet предлагает сегодня скорость передачи данных 1 Гбит/с, а без выделения дополнительного спектра разрыв эксплуатационных показателей между проводными и беспроводными ЛВС, вероятно, должен со временем увеличиться. Несмотря на меньшую скорость передачи данных, беспроводные ЛВС становятся все более предпочтительным средством доступа в Интернет во многих домах, офисах и университетских городках благодаря своему удобству и независимости от проводов. Тем не менее, большинство беспроводных ЛВС поддерживают приложения, пропускная способность которых невысока, например, электронную почту и просмотр страниц в Интернет. Проблемой беспроводных ЛВС будущего станет задача обеспечения одновременной работы большого числа абонентов с приложениями, требующими высокой пропускной способности и не терпящими задержек, такими как, например, видео. Расширение

³FCC — Federal Communications Commission.

⁴ISM — Industrial, Scientific and Medical.

диапазона частот также представляет важную задачу будущих беспроводных ЛВС.

Несомненно, наиболее успешное применение беспроводных сетей представляет сотовая телефония. Корнями эта система уходит еще в 1915 г., когда была осуществлена беспроводная передача речи между Нью-Йорком и Сан-Франциско. В 1946 г. была введена в эксплуатацию мобильная телефонная сеть общего пользования в 25 городах по всей территории США. Эта первая система использовала центральный передатчик для покрытия целого крупного города с его пригородами. Такое неэффективное использование спектра радиочастот в сочетании с состоянием радиотехники того времени значительно ограничивало емкость системы: спустя тридцать лет после введения сети мобильных телефонов нью-йоркская сеть могла обслуживать всего лишь 543 абонента.

Решение проблемы пропускной способности появилось в 1950-1960-е годы, когда исследователи АТ&Т «Белл лабораториз⁵» разработали *концепцию сотовой связи* [1]. Сотовые системы использовали то обстоятельство, что мощность передаваемого сигнала ослабевает с расстоянием. Таким образом, два пользователя могут работать на одной и той же частоте в пространственно удаленных друг от друга местах с минимальными взаимными помехами. Это обеспечивает эффективное использование частотного спектра, так что может быть подключено большое число пользователей. Развитие систем сотовой связи от первоначальной концепции до реализации отнюдь не было бурным. В 1947 г. компания АТ&Т запросила у FCC спектр частот для сотовой службы. Разработка системы была, в основном, завершена к концу 1960-х годов, но первое полевое испытание было проведено лишь в 1978 г., а FCC дала свое разрешение только в 1982 г. — к тому времени большая часть оригинальной технологии уже устарела. Первая аналоговая сотовая система, развернутая в Чикаго в 1983 г., к 1984 году, когда FCC увеличила часть спектра, предоставленную для сотовой системы, с 40 до 50 МГц, была уже полностью загружена. Стремительный рост сотовой индустрии ошеломил буквально всех. Действительно, маркетинговые исследования, проведенные АТ&Т перед развертыванием первой системы, предсказывали, что спрос на сотовые телефоны ограничится докторами и очень богатыми людьми. В 1980-х годах компания АТ&Т, в основном, прекратила сотовый бизнес, сосредоточившись на волоконно-оптических сетях, но со временем вернулась к этому бизнесу, когда его потенциал уже не вызывал сомнений. К концу 1980-х годов, когда все больше и больше городов захватывал

⁵Исследовательский центр компании «Белл телефон» [Bell Telephone Co.]. Исследования ведутся в области акустики, физики твердого тела, электроники, физической и органической химии и в ряде других областей. Находится в Нью-Йорке. — *Прим. перев.*

спрос на сотовые службы, возникла необходимость развития цифровой сотовой связи для увеличения мощности и достижения лучших эксплуатационных характеристик беспроводных систем.

Второе поколение сотовых систем, появившееся в начале 1990-х годов, было основано на принципах цифровой связи. Переход от аналогового к цифровому режиму был обусловлен большей пропускной способностью цифровых систем, а также лучшими показателями цифрового оборудования по стоимости, скорости и энергопотреблению. Хотя сотовые системы второго поколения первоначально предоставляли, в основном, речевые услуги, но постепенно они были доработаны для поддержки информационных служб, таких как электронная почта, доступ в Интернет и короткие сообщения. К сожалению, огромный рыночный потенциал сотовых телефонов привел к пролиферации (росту числа) стандартов второго поколения сотовой связи: только в США существует три стандарта, свои стандарты есть в Европе и Японии, и все они несовместимы друг с другом. Тот факт, что в разных городах существуют разные несовместимые стандарты, делает роуминг внутри США и по всему миру на основании только одного стандарта невозможным. Более того, в некоторых странах уже вводятся услуги систем третьего поколения, для которых существуют также несовместимые стандарты. В результате такой пролиферации стандартов многие сотовые телефоны сегодня являются многорежимными: они содержат разнообразные цифровые стандарты, обеспечивающие как связь внутри страны, так и роуминг по всему миру, а также, по возможности, поддерживающие аналоговый стандарт первого поколения, так как только этот стандарт обеспечивает универсальное покрытие по всей территории Соединенных Штатов.

Спутниковые системы обычно характеризуются высотой орбиты спутника: низкая околоземная орбита (высота низкой околоземной орбиты LEO⁶ — приблизительно 2000 км), средняя околоземная орбита (MEO⁷ — примерно 9000 км) или геостационарная орбита (GEO⁸ — 40 000 км). Геостационарные орбиты рассматриваются как стационарные по отношению к Земле, в то время как спутники, вращающиеся по другим орбитам, меняют зону своего покрытия в зависимости от времени. Концепция использования *геостационарных спутников* для связи была предложена писателем — научным фантастом Артуром К.Кларком в 1945 г. Однако первые спутники — советский «Спутник» в 1957 г. и спутник НАСА/«Белл лабораториз» «Echo-1» в 1960 г.— не были геостационарными из-за сложности подъема спутника на такую высокую орбиту. Первый геостацио-

⁶LEO — low earth orbit.

⁷MEO — middle earth orbit.

⁸GEO — geostationary earth orbit.

нарный спутник был запущен компанией «Хьюз» и НАСА в 1963 г., после чего в течение нескольких десятилетий геостационарные спутники господствовали как в коммерческих, так и в государственных спутниковых системах.

У геостационарных спутников большая зона покрытия, поэтому требуется немного спутников (и долларов), чтобы охватить широкую зону или даже обеспечить глобальное покрытие. Однако чтобы добраться до спутника, необходима большая мощность сигнала и, кроме того, задержка прохождения сигнала обычно очень велика для приложений с ограничением на величину задержки, как, например, телефонии. Эти неудобства явились причиной возврата в 1990-е годы назад, к спутникам на низкой околоземной орбите [2, 3]. Была поставлена задача сделать речевые и информационные службы конкурентоспособными по отношению к сотовым системам. Однако спутниковые мобильные терминалы были намного больше, потребляли намного больше энергии и стоили намного больше, чем современные сотовые телефоны, что ограничивало их привлекательность. Самое привлекательное качество этих систем — обеспечение полного покрытия по всему миру, особенно в отдаленных районах или в странах третьего мира, где нет наземных линий связи или инфраструктуры сотовой связи. К сожалению, в таких местах, как правило, нет большого спроса на услуги спутниковой связи или ресурсов для их оплаты. Так как сотовые системы оказались более распространенными по всему миру, они приносят больше дохода, чем спутниковые системы ЛЕО могли бы собрать в заселенных зонах. Большинство спутниковых систем, работавших на низкой околоземной орбите, ушли из бизнеса из-за отсутствия реальной рыночной ниши.

Естественная сфера применения спутниковых систем — транслирование развлекательных передач. Трансляция осуществляется в диапазоне 12 ГГц. Эти системы предлагают сотни телеканалов и составляют главную конкуренцию кабельному телевидению. Стало популярным также цифровое радио с трансляцией через спутник. Такие системы, действующие как в Европе, так и в США, предлагают цифровые звуковые передачи на качественном уровне, приближенном к качеству CD.

1.2. Перспективы развития беспроводной связи

Предвидение дальнейшего развития беспроводных средств связи, поддерживающих информационный обмен между людьми или устройствами, — это тот предельный уровень, которого они смогут достичь в течение последующих нескольких десятилетий, при этом большая часть таких

средств уже существует в той или иной форме. Это предвидение предполагает мультимедийную связь с любой точкой земного шара с помощью маленьких переносных устройств или небольших портативных компьютеров. Беспроводные сети соединят карманные, небольшие портативные и настольные компьютеры в любом месте в пределах офисного здания или университетского городка. В доме эти сети создадут новый класс интеллектуальных электронных устройств, которые смогут взаимодействовать друг с другом, а с добавлением Интернета — осуществлять связь между компьютерами, телефонами и системами наблюдения и безопасности. Такие «умные дома» могут также помочь пожилым людям и инвалидам в плане ухода за ними, наблюдения за состоянием их здоровья или же в случае необходимости экстренного вызова. Беспроводные развлекательные программы войдут в каждый дом и в любое другое место, где есть люди. Видеотелеконференции будут проходить между зданиями, находящимися друг от друга на расстоянии квартала или даже на другом континенте, эти конференции могут охватывать и тех, кто находится в дороге, — от продавцов, опоздавших на свой самолет, до директоров корпораций, плывущих в Карибском море. Беспроводная видеосвязь соединит в будущем удаленные учебные классы, средства дистанционного обучения и далеко расположенные больницы во всем мире. У беспроводных датчиков есть огромный диапазон приложений как коммерческих, так и военных. Коммерческие приложения включают в себя средства наблюдения для пожарной безопасности, видеоконтроль мест хранения токсичных отходов, нагрузок и деформаций зданий и мостов, движения углекислого газа, а также распространения химикатов и газов в зоне бедствия. Эти беспроводные датчики автоматически конфигурируются в сеть для осуществления и обработки измерений, а затем передают эту информацию на централизованный пульт управления. Военные приложения включают идентификацию и отслеживание вражеских целей, определение химических и бактериологических атак, поддержку неуправляемых человеком транспортных средств-роботов, а также анти-террористические мероприятия. И, наконец, беспроводные сети позволяют создать распределенные системы дистанционного управления устройствами, датчиками и исполнительными механизмами, связанными друг с другом беспроводными каналами. Такие системы, в свою очередь, позволят создать автоматизированные автомагистрали и мобильные роботы, а также легко перестраивать промышленную автоматику.

Все описанные здесь разнообразные приложения формируют концепцию беспроводной связи будущего. Так что же такое, собственно говоря, *беспроводная связь*? Есть много способов разделить эту сложную тему на классы по различным приложениям, системам или зонам покрытия [4].

Беспроводные приложения включают в себя радиотелефонную связь, доступ в Интернет, просмотр страниц Интернет, поисковые и короткие сообщения, службы информирования абонентов, передачу файлов, видеотелеконференции, развлекательные программы, зондирование и распределенное управление. Системы подразделяются на сотовые телефонные системы, беспроводные ЛВС, беспроводные глобальные информационные системы, спутниковые системы и специализированные беспроводные сети. Зоны покрытия могут быть внутри здания, университетского городка, города, а также региональными и глобальными. Задача лучшего определения беспроводной связи с учетом всех этих различных сегментов привела к существенной фрагментации данной сферы, о чем свидетельствует множество различных беспроводных устройств, стандартов и услуг, предлагаемых или предполагаемых. Одна из причин такой фрагментации состоит в том, что разные беспроводные приложения имеют разные требования. Так, телефонные системы имеют относительно низкие требования к скорости передачи данных (около 20 кбит/с) и могут допускать довольно высокую вероятность ошибок по битам (коэффициент ошибок — BER⁹, равный примерно 10^{-3}), но общая задержка должна быть менее 100 мс, иначе это будет заметно абоненту¹⁰. С другой стороны, информационные системы обычно требуют гораздо больших скоростей передачи данных (1–100 Мбит/с) и очень низкой величины коэффициента ошибок BER (10^{-8} или меньше, при этом все ошибочно принятые биты должны быть переданы повторно), но не имеют фиксированных требований к задержке. Видеосистемы реального времени имеют высокие требования к скорости передачи данных в сочетании с теми же ограничениями к задержкам, что и системы передачи речи, в то время как у поисковых систем и служб коротких сообщений невысокие требования к скорости передачи информации и отсутствуют строгие ограничения по задержкам. Эти различия в требованиях разных приложений затрудняют построение единой беспроводной системы связи, которая смогла бы удовлетворить все эти требования одновременно. Проводные сети обычно удовлетворяют различные требования разных приложений, используя единственный протокол, а это означает, что большинство строгих требований всех приложений должно быть удовлетворено одновременно. Это возможно на некоторых проводных сетях — со скоростью передачи информации порядка Гбит/с и коэффициентом ошибок порядка 10^{-12} , но невозможно в беспроводных сетях, которые имеют более низкие скорости

⁹BER — Bit Error Rate.

¹⁰Проводные телефоны имеют ограничение по задержке примерно в 30 мс. Сотовые телефоны ослабляют это ограничение примерно до 100 мс, а при передаче речевых сообщений через Интернет оно смягчается еще больше.

передачи и более высокие коэффициенты ошибок. Поэтому, по крайней мере, в ближайшем будущем беспроводные системы будут оставаться разделенными на классы и специализироваться на различных протоколах, обеспечивающих требования различных приложений.

Стремительный рост использования сотовых телефонов и беспроводного доступа к Интернет послужил поводом для большого оптимизма в отношении беспроводных технологий в целом. Очевидно, что не все беспроводные приложения будут процветать. С одной стороны, многие беспроводные системы и компании наслаждались впечатляющими успехами, с другой стороны, на этом пути было много неудач, включая беспроводные ЛВС первого поколения, спутниковую систему «Иридиум» (Iridium¹¹), большие информационные системы, такие как «Метриком» (Metricom), и беспроводный фиксированный доступ к дому — беспроводный «кабель». Поэтому, действительно, невозможно предугадать, какие взлеты и падения ждут беспроводную связь в будущем. Более того, инженерам и руководителям следует быть достаточно гибкими и изобретательными, чтобы добиться хотя бы незначительного успеха. Тем не менее, ясно, что и существующие и появляющиеся сегодня беспроводные системы в сочетании с прогнозированием тех приложений, которые могут потребоваться, гарантируют блестящее будущее беспроводным технологиям.

1.3. Технические решения

Для реализации возможностей беспроводных систем необходимо решить множество технических проблем. Эти проблемы пронизывают все аспекты разработки системы. Так как в беспроводных оконечных устройствах появляется больше функциональных возможностей, эти маленькие устройства должны поддерживать многочисленные режимы работы, различные приложения и информационные средства. Компьютеры обрабатывают звук, изображение, текст и видеoinформацию, но для выполнения многих операций в разных режимах в дешевом, легком, переносном устройстве, необходим прорыв в схемотехнике. Абоненты не хотят использовать большие батареи, которые часто нуждаются в подзарядке, поэтому портативный терминал в режимах передачи и обработки сигналов должен потреблять минимум энергии. Обработка сигнала, необходимая для поддержания мультимедийных приложений и сетевых функций, может быть достаточно энергоемкой. Поэтому сети, основанные на беспроводной инфраструктуре, такие как беспроводные ЛВС и сотовые системы, по возможности, размещают большую часть нагрузки по обработке сиг-

¹¹ Спутниковая система глобальной сотовой связи. — Прим. перев.



налов в стационарных пунктах с большими энергетическими ресурсами. Наличие таких узких мест и ненадежных узлов крайне нежелательно для системы в целом. Специальные беспроводные сети без инфраструктуры чрезвычайно привлекательны для многих приложений благодаря своей гибкости и устойчивости. В таких сетях вся обработка и контроль информации должны осуществляться в узловых точках сети по распределенной модели, что позволяет решить проблему эффективного использования энергии. Энергия представляет особенно критичный ресурс в сетях, в которых узлы не могут подзаряжать свои батареи, — например, в сетях датчиков. Создание сетей, которые бы удовлетворяли всем требованиям приложений при столь жестких ограничениях в энергии, остается большой технологической проблемой. Кроме того, ограниченный диапазон частот и случайные изменения параметров беспроводных каналов требуют помехоустойчивых приложений, которые позволили бы сгладить ухудшения параметров сети.

Из-за особенностей беспроводного канала разработка беспроводных сетей существенно отличается от проектирования проводной сети. Такой канал непредсказуем и представляет достаточно сложную передающую среду. Прежде всего, спектр радиочастот — это ограниченный ресурс, который необходимо распределять между множеством различных приложений и систем. По этой причине использование спектра регулируется соответствующими региональными и международными органами. Работа региональной или международной системы в заданном частотном диапазоне должна подчиняться ограничениям данного диапазона, установленным соответствующими органами. Диапазон частот может быть также очень дорогим: во многих странах лицензии на пользование спектром часто продаются на аукционе по наиболее высокой из предложенных цен. В Соединенных Штатах компании потратили свыше 9 миллиардов долларов на лицензии сотовой связи второго поколения, а на аукционе в Европе за использование спектра сотовой связи третьего поколения было собрано около 100 миллиардов долларов. Для привлекательности инвестиций диапазон частот, приобретенный на этих аукционах, должен использоваться особенно эффективно. Он также должен снова и снова повторно использоваться в одном и том же географическом регионе, что требует создания сотовых систем с высокой производительностью и хорошими эксплуатационными показателями. На сегодняшний день доступны радиокomпоненты приемлемых размеров, потребляемой мощности и стоимости для беспроводных систем, работающих на частотах в несколько гигагерц. Однако этот частотный диапазон чрезвычайно переполнен. Поэтому технологические прорывы по обеспечению работы более высокочастотных систем с той же самой стоимостью и эксплуатационными показателями должны

значительно сократить недостаток диапазона частот. Однако у всенаправленных антенн потери в тракте передачи на таких высоких частотах больше, что также ограничивает используемый диапазон.

Распространяясь в беспроводном канале, сигнал испытывает случайные флуктуации во времени из-за изменений отражений и затуханий при движении передатчика, приемника или окружающих объектов. Поэтому кажется, что характеристики канала беспорядочно изменяются во времени, из-за чего возникают трудности создания надежных систем с гарантированными эксплуатационными характеристиками. В беспроводных системах также сложно обеспечить безопасность, так как каждый может перехватить радиопередачу с помощью высокочастотной антенны. У аналоговых сотовых систем нет защиты, поэтому любой может прослушивать разговоры, просто сканируя аналоговый сотовый частотный диапазон. Все цифровые сотовые системы обладают средствами, обеспечивающими определенный уровень шифрования. Однако при достаточном уровне знаний, времени и вычислительных ресурсов большинство этих методов шифрования могут быть взломаны; и действительно, некоторые из них уже были скомпрометированы. Для поддержания таких приложений, как электронная коммерция и деловые операции с кредитными картами, беспроводные сети должны быть защищены от подобных «слушателей».

Таким образом, беспроводные системы стоят перед большими проблемами. Сеть при любых обстоятельствах должна быть в состоянии определить местоположение данного пользователя среди миллиардов мобильных аппаратов, распределенных по всему миру. Затем она должна обеспечить соединение с этим абонентом, когда он передвигается со скоростью до 100 км/ч. Конечные ресурсы сети должны быть распределены четким и эффективным способом, в соответствии с изменяющимися требованиями и местоположением пользователя. Более того, в настоящее время существует гигантская инфраструктура проводных сетей: телефонная система общего пользования, Интернет, волоконно-оптические кабели, которые могут использоваться для объединения беспроводных систем в единую всемирную сеть. Однако беспроводные системы с мобильными пользователями никогда не смогут соревноваться с проводными системами в плане скорости передачи информации и надежности. Взаимодействие беспроводных и проводных сетей с очень разными эксплуатационными показателями представляет собой сложную проблему.

Вероятно, наиболее значимой технической проблемой в создании беспроводных систем является пересмотр самого процесса их создания. Проводные системы, в основном, разрабатываются в соответствии с многоуровневым подходом, когда протоколы, связанные с различными уровнями

системы, создаются изолированно, при наличии базовых механизмов взаимодействия между уровнями. Уровни в беспроводной системе включают в себя: канальный или физический уровень, который обеспечивает передачу бит в передающей среде; уровень доступа, который обеспечивает совместный доступ к передающей среде; сетевой и транспортный уровни, которые обеспечивают соединение и передачу информации «из конца в конец», и уровень приложений, который определяет скорость передачи данных «из конца в конец» и допустимые задержки, обусловленные приложениями. Хотя методология разбиения на уровни снижает сложность системы, обеспечивает модульность структуры и способствует стандартизации, но она, из-за отсутствия оптимизации всей разработки, приводит также к потерям и неэффективному использованию параметров системы. Высокая пропускная способность и надежность проводных систем смягчают эту неэффективность во многих проводных сетевых приложениях, хотя она и мешает хорошей работе приложений, не допускающих задержек, таких как передача речи и видео. В беспроводных системах ситуация существенно отличается. Параметры беспроводных каналов могут оказаться очень плохими. Эти параметры в зависимости от количества пользователей и топологии сети изменяются во времени. В сущности, само понятие беспроводной линии до некоторой степени представляет завуалированный намек на саму природу распространения радиоволн и радиовещания. Переменчивая природа и низкая эффективность беспроводных каналов связи указывают на то, что для таких каналов должны быть оптимизированы высококачественные сети, которые должны быть устойчивы и адаптивны к изменениям радиоканала, а также к динамическим свойствам сети. Поэтому эти сети требуют интегрированных и адаптивных протоколов на всех уровнях, начиная с канального, до прикладного. Разработка такой многоуровневой структуры протоколов требует междисциплинарной экспертизы в области связи, передачи сигналов, теории и проектирования сетей.

В следующем разделе дан обзор существующих сегодня беспроводных сетей. Из обзора ясно, что изложенные выше перспективы беспроводных технологий остаются задачами будущего со множеством технических трудностей, требующих преодоления. Эти трудности детально исследуются в данной книге.

1.4. Современные беспроводные системы

Данный раздел содержит краткий обзор современных беспроводных систем. Структурные элементы этих систем постоянно развиваются, появляются новые системы, а старые оказываются в стороне. Поэтому мы рас-

смаатриваем, в основном, аспекты разработки элементов высшего уровня наиболее распространенных систем. Более детальное изложение стандартов беспроводных систем можно найти в работах [5, 6, 7]. Краткое изложение основных стандартов беспроводных систем дано в приложении Г.

1.4.1. Сотовые телефонные системы

Сотовые телефонные системы чрезвычайно популярны и прибыльны во всем мире: это системы, которые совершили беспроводную революцию. *Сотовые системы* обеспечивают двустороннюю телефонную связь и передачу данных в местном, общегосударственном и международном масштабе. Первоначально сотовые системы создавались для обслуживания мобильных терминалов внутри транспортных средств с антеннами, установленными на крыше транспортного средства. Сегодня эти системы эволюционировали до поддержки легких переносных мобильных аппаратов, работающих внутри зданий и на улице при передвижении пешехода или транспортного средства.

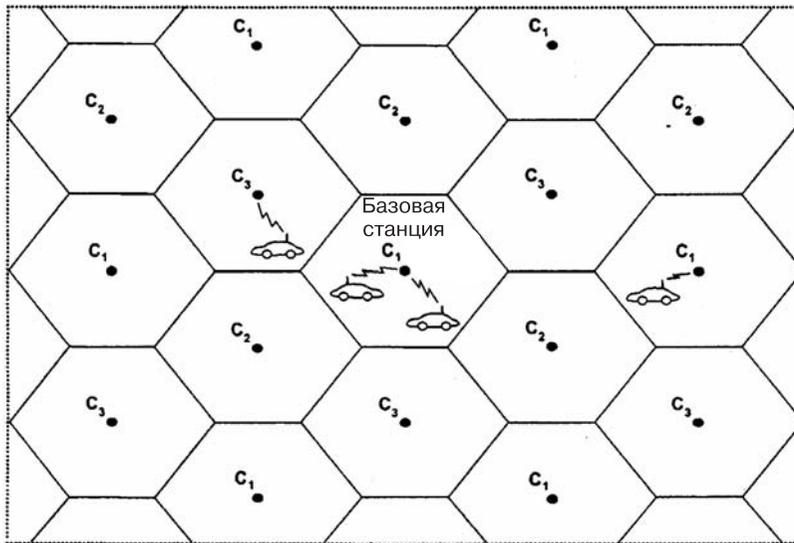


Рис. 1.1.
Сотовая система

В основе разработки сотовых систем лежит принцип многократного использования частот, которому способствует то обстоятельство, что с расстоянием мощность сигнала ослабевает, что позволяет повторно использовать тот же самый частотный диапазон на пространственно удаленных друг от друга территориях. Для этого зона покрытия сотовой системы разделяется на непересекающиеся *ячейки (соты)*. Каждой соте выделяется определенный комплект каналов. Как показано на рис. 1.1,

тот же самый комплект каналов используется и в другой ячейке, которая находится на достаточном удалении (C_i обозначает комплект каналов, используемый в данной соте). Работа внутри ячейки централизованно управляется базовой станцией, что будет подробно описано ниже. Взаимные влияния, вызванные абонентами различных сот, работающих с одним и тем же комплектом каналов, называются межсотовыми помехами. Разделение ячеек, повторно использующих одинаковые комплекты каналов, в пространстве, т.е. расстояние многократного использования частот, должно быть по возможности меньше с тем, чтобы частоты использовались как можно чаще, максимизируя, таким образом, эффективность использования спектра. Однако при этом из-за сокращения расстояния между влияющими друг на друга ячейками возрастают межсотовые помехи. Поскольку для поддержания необходимых качественных показателей системы межсотовые помехи должны оставаться ниже заданного порога, то расстояние многократного использования частот не может быть уменьшено ниже определенного минимального значения. На практике довольно сложно определить это минимальное значение, так как и передаваемые, и мешающие сигналы подвержены случайным изменениям мощности, обусловленным характеристиками распространения радиосигналов. Чтобы определить наилучшее расстояние многократного использования частот и место размещения базовой станции, необходима точная характеристика распространения сигнала внутри ячеек.

Первоначальные проекты сотовых систем главным образом отличались высокой стоимостью базовой станции, примерно один миллион долларов каждая. По этой причине первые сотовые системы использовали относительно небольшое количество ячеек для покрытия целого города или региона. При этом базовые станции размещались на высоких зданиях или горах и работали с очень высоким уровнем мощности, с зоной покрытия ячейки в несколько квадратных километров. Такие большие ячейки называются макросотами. Мощность сигнала распространялась однородно по всем направлениям, поэтому при передвижении мобильного аппарата по окружности вокруг базовой станции получаемый уровень сигнала был примерно постоянным, если только прохождению сигнала не мешал какой-либо объект, вносящий затухание. Этот круговой контур постоянной мощности определяет шестиугольную форму ячейки в системе, так как шестиугольник является самой близкой к окружности геометрической формой, которая позволяет покрыть заданную зону множеством непересекающихся ячеек без просветов.

В настоящее время сотовые системы в городских районах чаще всего используют ячейки меньшего размера, а базовые станции размещаются близко к городским улицам и работают с намного меньшей излучаемой

мощностью. Такие меньшие по размеру ячейки называются *микросотами* или *пикосотами*, в зависимости от их размера. Переход к ячейкам меньшего размера произошел по двум причинам: это потребность в большей пропускной способности в регионах с высокой плотностью населения, а также уменьшение объемов и стоимости электронного оборудования базовой станции. Если система спроектирована надлежащим образом, то ячейка любого размера поддерживает работу приблизительно одинакового числа пользователей. Таким образом, для заданной зоны покрытия система с большим числом микросот имеет большее число абонентов на единицу площади зоны, чем система с несколькими макросотами. Кроме того, в системе с микросотами необходим меньший уровень передачи мобильных терминалов, так как они расположены ближе к базовым станциям. Однако переход к меньшим ячейкам усложнил процесс проектирования сети. Мобильные средства связи быстрее пересекают маленькую ячейку, чем большую, поэтому *передача обслуживания вызова* должна происходить намного быстрее. Кроме того, усложняется определение местоположения, так как внутри данной зоны находится больше ячеек, в которых может находиться мобильный аппарат. Также сложнее разработать общие модели распространения сигналов для маленьких ячеек, так как прохождение сигнала в этих ячейках сильно зависит от размещения базовой станции, а также от геометрии окружающих отражателей. Так, шестиугольная форма сот не дает хорошего приближения распространения сигнала в микросотах. Микросотовые системы часто проектируются с использованием квадратной или треугольной *формы ячеек*, но у этих форм более высокий допустимый коэффициент ошибок при аппроксимации распространения сигналов в микросотах [8].

Все базовые станции данной географической зоны связаны высокоскоростными линиями связи с коммутационной станцией мобильной связи — автоматической телефонной станцией мобильной связи АТС МС, как это показано на рис. 1.2. Коммутационная станция действует как центральный *контроллер сети*: распределяет каналы внутри каждой ячейки, координирует передачу обслуживания вызовов между ячейками, если мобильный аппарат пересекает границу ячейки, а также осуществляет маршрутизацию вызовов к мобильным абонентам и от них. Коммутационная станция может выполнять телефонные соединения с телефонной сетью общего пользования (ТСОП) или обеспечивать доступ в Интернет. Каждый новый абонент, расположенный в данной ячейке, запрашивает канал, посылая вызов к базовой станции соты по отдельному управляющему сигнальному каналу. Запрос передается на АТС МС, которая принимает запрос, если в этой ячейке есть в наличии канал доступа. Если в данный момент не доступен ни один канал, запрос на соединение

отклоняется. *Передача обслуживания вызова* инициируется, когда базовая станция или мобильный аппарат в данной ячейке определяет, что полученная мощность принимаемого сигнала вызова приближается к границе заданного минимума. В таком случае базовая станция информирует АТС МС, что мобильный аппарат запрашивает передачу обслуживания вызова, а АТС МС, в свою очередь, запрашивает окружающие базовые станции, может ли одна из этих станций обнаружить сигнал данного мобильного аппарата. При получении положительного ответа АТС МС выполняет передачу обслуживания вызова от исходной базовой станции к новой. Если в новой ячейке не доступен ни один канал, то передачи обслуживания не происходит, а вызов завершается. Вызов также теряется, если интенсивность сигнала между мобильным устройством и базовой станцией падает ниже минимума, необходимого для поддержания связи, в результате случайных изменений сигнала.

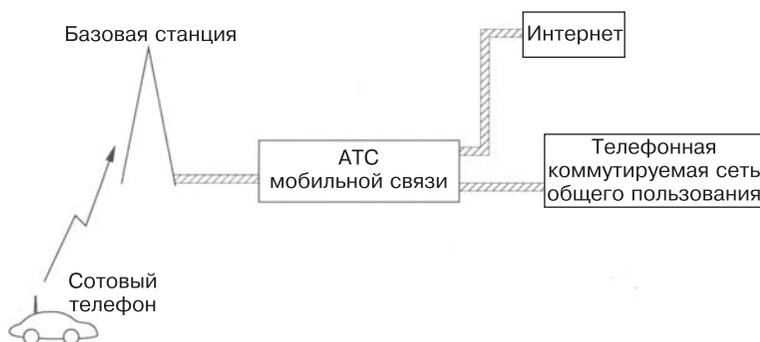


Рис. 1.2. Архитектура современной сотовой сети

Сотовые системы связи первого поколения были аналоговыми; эти системы были разработаны в 1960-х годах¹², когда цифровые системы еще не получили широкого распространения. Системы второго поколения превратились из аналоговых в цифровые, так как у последних много преимуществ. Их компоненты дешевле, они более быстродействующие и имеют меньшие размеры, а также потребляют меньше энергии. Снижение качества передачи речи, вызванное искажениями канала, может быть уменьшено с помощью кодирования с исправлением ошибок и методов обработки сигнала. Цифровые системы по сравнению с аналоговыми системами обладают также большей пропускной способностью, так как они могут использовать более эффективные цифровые методы мо-

¹²Первые аналоговые системы передачи с частотным разделением каналов появились во время Первой мировой войны, а аналоговые коммутационные станции еще раньше — в 80-е годы XIX века. — *Прим. перев.*

дуляции и более эффективные технологии использования спектра. Также цифровые системы могут использовать преимущества современных методов сжатия и факторов активности речи. Кроме того, для защиты цифровых сигналов от подслушивания могут использоваться криптографические методы защиты. Цифровые системы, помимо передачи речи, могут также предложить новые информационные услуги, включая передачу коротких сообщений, электронную почту, доступ в Интернет и возможность передачи изображений (видеотелефоны). Из-за более низкой стоимости и более высокой эффективности цифровых систем поставщики услуг использовали агрессивную ценовую политику для поощрения перехода абонентов от аналоговых к цифровым системам, и сегодня аналоговые системы используются, главным образом, в местах, где нет цифровых услуг. Однако цифровые системы не всегда работают так же, как аналоговые. Абоненты могут столкнуться с плохим качеством звука, частым сбрасыванием вызовов, а также неравномерным покрытием в определенных зонах. Эксплуатационные показатели сотовых систем значительно улучшились с развитием технологии и сетей. В некоторых районах сотовые телефоны обеспечивают практически то же качество, что и проводные службы. И некоторые люди действительно заменили проводные телефоны у себя дома на сотовое обслуживание.

Разделение по частоте в системах связи, называемое также *множественным, многоканальным или многостанционным доступом*, осуществляется с помощью разделения пространства сигнала по времени, частоте, и/или кодовой составляющей. При *многостанционном доступе с частотным разделением каналов* (МДЧР)¹³ весь частотный диапазон системы подразделяется на ортогональные¹⁴ частотные каналы. При *многостанционном доступе с временным разделением каналов* (МДВР)¹⁵ промежуток времени разделяется на ортогональные интервалы, и каждый канал занимает всю полосу частот в течение выделенного ему временного интервала. Системы МДВР сложнее в реализации, чем системы МДЧР, так как каналы должны быть синхронизированы по времени. Однако в системах МДВР проще обеспечить многократное увеличение скорости передачи данных, так как для одного абонента может быть выделено несколько временных интервалов. *Многостанционный доступ с кодовым разделением каналов* (МДКР)¹⁶ (CDMA) обычно использует расширение спектра методами прямой последовательности или скачкообразной перестройки частоты с ортогональными или неортогональными

¹³ В англ. FDMA — от Frequency Division Multiple Access. — *Прим. перев.*

¹⁴ То есть непересекающиеся частотные полосы. — *Прим. перев.*

¹⁵ В англ. TDMA — от Time Division Multiple Access. — *Прим. перев.*

¹⁶ В англ. CDMA — от Code Division Multiple Access. — *Прим. перев.*

кодами. При использовании *метода прямой последовательности* поток бит данных каждого абонента модулируется различными последовательностями чипов — более коротких бит, которые намного быстрее модулируемой последовательности бит данных. В частотной области узкополосный сигнал данных перемножается с широкополосным сигналом потока чипов, что приводит к образованию сигнала с более широким частотным спектром, чем у исходного информационного сигнала. При *скачкообразной перестройке частоты* несущая частота, используемая для модуляции узкополосного информационного сигнала, изменяется в соответствии с последовательностью чипов, которая может быть быстрее или медленнее потока данных. Это приводит к тому, что модулированный сигнал «скачет» по различным несущим частотам. Сигналы с широкополосным спектром обычно накладываются друг на друга в одном и том же диапазоне частот. Приемник сигналов с широким спектром разделяет сигналы с помощью отдельного декодирования индивидуальной расширяющей последовательности каждого канала. Однако в случае неортогональных кодов абоненты внутри ячейки мешают друг другу (внутрисотовые помехи), а при повторном использовании кодов в различных сотах возникают межсотовые помехи. Мощность как внутрисотовых, так и межсотовых помех снижается при увеличении коэффициента расширения кода. Более того, помехи в системах с расширением спектра могут быть в дальнейшем еще понижены за счет многопользовательского детектирования или подавления помех. Более подробно о различных методах распределения спектра и анализе его характеристик можно прочитать в гл. 13 и 14. Разработка технических решений для распределения спектра связана с очень сложными компромиссами, и решение о том, какой метод лучше использовать для данной системы и рабочего окружения, никогда не было прямолинейным. Разработка эффективных систем сотовой связи ограничивается помехами, т. е. основное ограничение на систему накладывает уровень помех, в противном случае к системе можно было бы подключить больше абонентов. В результате любой метод снижения помех в сотовых системах напрямую ведет к повышению емкости системы и ее эксплуатационных показателей. Среди методов снижения помех, используемых сегодня или предлагаемых для будущих систем, — фрагментация сот, направленные и «умные, интеллектуальные» антенны, многопользовательское детектирование и динамическое распределение ресурсов. Подробно об этих методах можно прочитать в гл. 15.

Сотовые системы *первого поколения* 1G, известные в Соединенных Штатах под названием усовершенствованной мобильной телефонной системы *AMPS*¹⁷, использовали метод МДЧР (FDMA) с телефонными ка-

¹⁷AMPS — Advance Mobile Phone Service.

налами шириной 30 кГц с ЧМ. Федеральная комиссия по связи США — FCC — первоначально выделила для этой системы полосу шириной 40 МГц, а в дальнейшем, вскоре после расширения системы для обслуживания большего числа абонентов, увеличила ее до 50 МГц. Весь диапазон частот был разделен на две полосы по 25 МГц, одна из которых предназначалась для каналов связи в направлении от мобильного устройства к базовой станции, а другая — для каналов в направлении от базовой станции к мобильным устройствам. Для стимулирования конкуренции FCC разделила эти каналы на два комплекта, которые в каждом городе выделялись двум различным компаниям — поставщикам услуг. В Европе появилась похожая система мобильной связи TACS¹⁸. В 1980-е годы стандарт AMPS распространялся по всему миру и до сих пор в некоторых регионах, включая сельские районы США, остается единственной сотовой службой.

Многие сотовые системы первого поколения в Европе были несовместимыми, и европейцы быстро разработали единый общий стандарт цифровых систем второго поколения 2G, получивших название GSM¹⁹. Стандарт GSM использует комбинацию МДВР (TDMA) и медленной скачкообразной перестройки частоты с частотной манипуляцией для модуляции речи. Напротив, в США стандарты, касающиеся второго поколения цифровых сотовых систем, вызвали яростные дебаты по поводу методик разделения спектра, в результате чего появилось несколько несовместимых стандартов [9–11]. В частности, существуют два стандарта в полосе частот 900 МГц: IS-136²⁰, использующий сочетание МДВР (TDMA) и МДЧР (FDMA) с фазовой манипуляцией ФМН; и IS-95, использующий метод прямой последовательности МДКР (CDMA) с ФМН и кодирование [12, 13]. Спектр для цифровых сотовых систем PCS²¹ в диапазоне 2 ГГц был продан с аукциона, поэтому поставщики услуг в своем спектре могли использовать любые стандарты. В конечном итоге возникло три различных цифровых стандарта сотовой связи для этого частотного диапазона: IS-136, IS-95 и европейский стандарт GSM. Цифровой сотовый стандарт в Японии похож на IS-136, но работает в другом частотном диапазоне, а система GSM в Европе — на другой частоте, нежели системы GSM в Соединенных Штатах. Это распространение несовместимых стандартов в США и в мире делает невозможным роуминг между системами

¹⁸ TACS — Total Access Communication System.

¹⁹ Аббревиатура GSM первоначально обозначала Group Special Mobile (специальная мобильная группа) — название европейского документа, установившего стандарт GSM. Когда системы GSM распространились по всему миру, данное сокращение было изменено на Global Systems for Mobile Communications — Глобальные системы мобильной связи.

²⁰ IS-136 является развитием более старого стандарта IS-54 и относится к его группе.

²¹ PCS — Personal Communication System.

внутри страны или во всем мире без использования телефонов с несколькими режимами и/или нескольких телефонов (и телефонных номеров).

Все эти сотовые стандарты второго поколения были усовершенствованы для предоставления высокоскоростных услуг пакетной передачи данных [14]. Системы GSM при объединении всех временных канальных интервалов могут обеспечить одному абоненту скорость передачи данных до 140 кбит/с. Такая модернизация получила название GPRS. Более фундаментальное усовершенствование технологии стандарта GSM (EDGE²²) увеличило скорость передачи данных до 384 кбит/с благодаря использованию формата высокоуровневой модуляции в сочетании с кодированием. Эта модуляция более чувствительна к замираниям, поэтому для решения данной проблемы EDGE использует адаптивные методы. В частности, в EDGE применяются девять различных комбинаций модуляции и кодирования, каждая из которых оптимизирована для определенных значений отношения «сигнал/шум» (SNR) на приеме. Величина SNR измеряется на приеме и передается обратно на передатчик, и, таким образом, используется лучшая комбинация модуляции и кодирования для данного значения SNR. Системы IS-136 для поддержания скорости передачи данных до 384 кбит/с также используют технологии GPRS и EDGE. Системы IS-95 поддерживают скорость передачи данных до 115 кбит/с при объединении расширяющих функций.

Сотовые системы *третьего поколения* 3G основываются на стандарте широкополосного МДКР (CDMA), разработанном при содействии Международного союза электросвязи МСЭ [14]. Этот стандарт, названный «Международная мобильная связь 2000» — IMT-2000²³, в зависимости от мобильности и местоположения обеспечивает различные скорости передачи данных: от 384 кбит/с для пешеходов до 144 кбит/с при использовании транспортных средств и 2 Мбит/с при использовании внутри зданий. Стандарт 3G несовместим с системами 2G, поэтому поставщики услуг должны сначала обеспечить инвестиции в новую инфраструктуру, прежде чем они смогут предоставлять услуги 3G. Системы 3G были разработаны в Японии. Одной из причин того, что услуги 3G сначала появились в Японии, оказался процесс распределения спектра 3G, который был выделен без каких-либо предварительных расходов. В Европе и США спектр 3G распределяется через аукционы, поэтому любой компании, желающей предоставлять услуги 3G, требуются большие первоначальные инвестиции. Европейские компании в общей сложности заплатили за рабочий диапазон 3G на аукционах свыше 100 миллиардов долларов США.

²²EDGE — Enhanced Data rates for GSM Evolution.

²³IMT — International Mobile Telecommunications.

В Европе было много дебатов по поводу распределения спектра 3G через аукционы. Компании жаловались на то, что сама природа аукционов обуславливает чрезмерные переплаты и поэтому будет сложно, если не невозможно, получить прибыль. Некоторые из компаний решили списать свои вложения за диапазон 3G и не заниматься разработкой системы. Действительно, системы 3G не развивались в Европе так, как ожидалось, и оказалось, что усовершенствования передачи данных в системах 2G могут быть достаточными для удовлетворения потребительского спроса, по меньшей мере, еще на какое-то время. Однако спектр 2G в Европе очень перенасыщен, поэтому либо абоненты постепенно будут переходить на 3G, либо правила будут изменены таким образом, что частотный диапазон 3G сможет использоваться для услуг 2G (что в настоящее время в Европе не разрешается). Развитие 3G в Соединенных Штатах намного отстало по сравнению с Европой. Доступный в США спектр 3G составляет примерно половину европейского. Из-за споров по поводу того, какая из частей спектра будет использоваться, аукционы по продаже спектра 3G в США еще не проводились. Однако правила, действующие в США, позволяют использовать для 3G спектры 1G и 2G, и эта гибкость больше способствует постепенному развертыванию и инвестированию систем 3G, чем все более ограничивающие требования к 3G в Европе. Оказалось, что запаздывание с аукционами по продаже спектра 3G в Соединенных Штатах дало возможность Федеральной комиссии по связи FCC и американским поставщикам услуг учиться на ошибках и успехах Европы и Японии.

1.4.2. Беспроводные телефоны

Беспроводные телефоны впервые появились в конце 1970-х годов и до сих пор переживают бурное развитие. Во многих американских домах есть только беспроводные телефоны, что может быть угрозой безопасности, так как в отличие от проводных телефонов, они не работают при отсутствии электроэнергии. Беспроводные телефоны были разработаны для обеспечения соединений с телефонной сетью общего пользования ТСОП при низкой себестоимости и низком уровне мобильности, т. е. для коротких беспроводных соединений, замещающих проводную связь телефонной базы с его трубкой. Поскольку беспроводные телефоны конкурируют с проводными трубками, они должны обеспечивать то же качество передачи речи. Первоначально у беспроводных телефонов было плохое качество передачи речи, и потребители быстро от них отказались. Первые беспроводные системы позволяли соединить с «базой» только одну телефонную трубку, маленькой была также и зона покрытия — несколько комнат дома или офиса. Это остается главным аргументом против беспроводных теле-

фонов в Соединенных Штатах. Сегодня увеличилась также и зона покрытия, хотя некоторые «базы» поддерживают несколько трубок. В Европе и Азии системы беспроводных цифровых телефонов эволюционировали и обеспечивают покрытие намного больших зон как внутри, так и вне дома, и по многим позициям схожи с сотовыми телефонными системами.

Базовые блоки беспроводных телефонов соединяются с ТСОП таким же образом, как и проводные телефоны городских линий связи, и поэтому не создают каких-либо дополнительных осложнений в работе телефонной сети. Подвижность этих беспроводных трубок чрезвычайно ограничена: трубка должна находиться внутри зоны передачи своей «базы». С другими системами беспроводных телефонов связи нет, поэтому высокая плотность этих систем в маленьких зонах (например, в высотном доме) может привести к значительным взаимным помехам между системами. По этой причине в беспроводных телефонах сегодня много речевых каналов, и они сканируют эти каналы, чтобы среди них найти канал с минимальным уровнем помех. Многие беспроводные телефоны используют методы расширения спектра для подавления помех, создаваемых другими системами беспроводных телефонов или подобными системами типа радиосистем наблюдения за ребенком — «радионянек» и беспроводных ЛВС.

В Европе и Азии цифровые беспроводные телефоны второго поколения СТ-2²⁴ имеют широкий диапазон использования помимо квартир или офисов. Внутри помещения эти системы действуют в качестве обычных беспроводных телефонов. Для расширения зоны вне пределов дома базовые станции (также называемые фоун-пойнт или телепойнт²⁵) устанавливаются в местах скопления людей: в торговых пассажах, на оживленных улицах, железнодорожных вокзалах и в аэропортах. Беспроводные телефоны, зарегистрированные у провайдера телепойнта, могут делать вызовы всякий раз, когда они находятся в зоне телепойнта. Телепойнт не позволяет абонентам принимать вызовы, так как у сети нет средств поддержки связи с мобильными абонентами, хотя некоторые трубки СТ-2 имеют встроенные пейджеры для компенсации этого недостатка. Эти системы также не переадресуют вызов, если абонент передвигается между различными телепойнтами, так что абонент должен оставаться внутри зоны покрытия того телепойнта, где его вызов был инициирован в течение всего разговора. Служба телепойнта дважды вводилась в Великобритании и оба раза терпела неудачу, но, начиная с середины 1990-х годов, такие системы стремительно развивались в Гонконге и Сингапуре. Одна-

²⁴СТ-2 — cordless telephone, second generation.

²⁵Система, по которой абонент телефонной сети может звонить из общественного пункта, используя собственный портативный телефон. Введена в 1989 г., постепенно заменяет традиционную телефонную будку. — *Прим. перев.*

ко через несколько лет этот стремительный рост быстро пошел на спад — после того, как операторы сотовой телефонии снизили цены, чтобы конкурировать со службой телепойнта. Основными недостатками в работе телепойнта были недостаточная дальность радиосвязи и отсутствие переадресации вызова. Так как сотовые системы избежали этих проблем, а цены были конкурентоспособными, у людей было мало причин использовать службу телепойнта. Большинство этих служб сегодня исчезло.

Результат другой ветви эволюции беспроводных телефонов, созданных первоначально для офисных помещений, представляет система стандарта DECT²⁶. Основной функций DECT является мобильная поддержка абонентов, использующих внутреннюю домовую или учрежденческую телефонную станцию (УАТС) с выходом в сеть общего пользования. В системах DECT «базы» устанавливаются по всему зданию, и каждая базовая станция связывается через контроллер с УАТС здания. Телефонные трубки связываются с ближайшей базовой станцией в здании, и соединения передаются по мере того, как пользователь передвигается между базовыми станциями. В DECT можно также позвонить на трубку с ближайшей базовой станции. Стандарт DECT также поддерживает службы телепойнта, хотя это приложение не получило достаточного развития (в основном, вероятно, из-за недостатков СТ-2). В настоящее время в Европе насчитывается около 7 миллионов пользователей DECT, но стандарт еще не распространился на другие страны.

Более развитой является система беспроводных телефонов PHS²⁷, которая появилась в Японии. Система PHS очень похожа на сотовую систему; она обладает широкой сетью базовых станций, поддерживающих механизмы передачи обслуживания и маршрутизации вызовов между базовыми станциями. Благодаря этим своим возможностям PHS не имеет основных ограничений системы СТ-2. Первоначально системы PHS имели самые высокие темпы роста, которые когда-либо испытывали новые технологии. В 1997 г., два года спустя после введения системы PHS, количество абонентов PHS возросло до максимального значения — примерно 7 млн., но затем популярность PHS начала уменьшаться из-за существенного снижения цен на услуги сотовой связи. В 2005 г. было около 4 млн. абонентов, которых привлекали абонентская служба с оплатой по единому тарифу и относительно высокая скорость передачи данных (128 кбит/с). Операторы PHS пытаются поднять скорость передачи данных до 1 Мбит/с, с которой сотовые операторы пока еще не могут со-

²⁶ DECT (European Digital Enhanced Cordless Telecommunications) — Европейский стандарт усовершенствованной цифровой беспроводной связи. — *Прим. перев.*

²⁷ PHS (Personal Handy-phone System) — Система персональных мобильных телефонов. — *Прим. перев.*

стяжаться. Основное различие между системой PHS и сотовой системой в том, что PHS не может поддерживать передачу обслуживания вызова (хэндовер) со скоростью движения транспортного средства. Причина этого недостатка заключается, главным образом, в динамической процедуре распределения каналов, используемой в PHS. Динамическое распределение каналов в значительной мере повышает количество телефонных трубок, обслуживаемых одной базовой станцией, и, соответственно, скорость передачи сигнала, что, в свою очередь, снижает стоимость системы, но это также усложняет процедуру переадресации вызова. Учитывая длительную популярность PHS, маловероятно, что они в скором времени пройдут тот же путь, что и CT-2, особенно если им удастся достигнуть еще большей скорости передачи данных. И все же из недавней истории систем беспроводных телефонов видно, что для расширения зоны использования этих систем за границы дома требуется либо гармонизация с сотовыми системами, либо превосходство над ними в функциональности, либо значительное сокращение стоимости.

1.4.3. Беспроводные локальные вычислительные сети — беспроводные ЛВС

Беспроводные ЛВС (Wireless LAN) поддерживают высокоскоростную передачу данных в пределах небольшого пространства (например, университетского городка или небольшого здания), когда пользователи перемещаются с места на место. Беспроводные устройства, которые имеют доступ к этим ЛВС, обычно стационарные или движутся со скоростью пешехода. Все стандарты беспроводных ЛВС в США действуют в нелицензируемом частотном диапазоне. Основные нелицензируемые полосы частот — это диапазоны ISM на 900 МГц, 2,4 ГГц и 5,8 ГГц, а также диапазон нелицензируемой национальной информационной инфраструктуры (U-NII) на 5 ГГц. В диапазонах ISM нелицензируемые пользователи являются вторичными пользователями и поэтому вынуждены справляться с помехами, создаваемыми первичными пользователями в то время, когда они активны. В диапазоне U-NII первичных пользователей нет. Для работы в диапазонах ISM или U-NII лицензии Федеральной комиссии FCC не требуется. Однако это преимущество является палкой о двух концах, так как другие нелицензируемые системы также действуют в этих диапазонах по той же самой причине, что может вызвать очень сильные взаимные помехи между системами. Проблема интерференции уменьшается при установлении для нелицензируемых систем ограничений мощности на единицу частотного диапазона. Беспроводные ЛВС могут иметь либо соединение звездой с пунктами беспроводного доступа или концентраторами, расположенными внутри зоны покрытия, либо архитектуру

одноранговой вычислительной сети ЛВС, где беспроводные терминалы автоматически конфигурируются в сеть.

В начале 1990-х годов появились десятки компаний — поставщиков оборудования и услуг беспроводных ЛВС, стремившихся заработать на неудовлетворенном спросе на высокоскоростную беспроводную передачу данных. Эти беспроводные ЛВС первого поколения базировались на несовместимых пользовательских протоколах. Большинство из них действовало в полосе 26 МГц частотного диапазона ISM 900 МГц, используя расширение спектра прямой последовательностью со скоростью передачи данных порядка 1–2 Мбит/с. Использовались как соединение звездой, так и архитектура одноранговой сети. Отсутствие стандартизации в данной области привело к высокой стоимости разработки, мелкосерийному производству и маленьким рынкам для каждого отдельного вида продукции. Из всей этой оригинальной продукции только небольшое количество было более-менее успешным. Всего лишь одна из беспроводных ЛВС первого поколения — «Альтаир» (Altair) фирмы Motorola — работала вне частотного диапазона 900 МГц. Эта система, работавшая в лицензируемом диапазоне 18 ГГц, имела скорость передачи данных порядка 6 Мбит/с. Однако применение «Альтаира» было затруднено из-за высокой стоимости компонентов и больших потерь в тракте передачи на 18 ГГц, и «Альтаир» был снят с производства через несколько лет после выпуска.

Беспроводные ЛВС *второго поколения* в Соединенных Штатах действуют в полосе шириной 83,5 МГц в диапазоне ISM 2,4 ГГц. Стандарт IEEE 802.11b для беспроводных ЛВС этого частотного диапазона был разработан, чтобы избежать некоторых проблем с запатентованными системами первого поколения. Стандарт определяет расширение спектра методом прямой последовательности при скорости передачи данных порядка 1,6 Мбит/с (максимальная физическая скорость передачи данных — 11 Мбит/с) и зоне покрытия около 100 м. Построение сети может быть в виде соединений звездой или архитектуры одноранговой сети, хотя последняя редко используется. Многие компании начали разрабатывать свою продукцию, опираясь на стандарт 802.11b. После медленного первоначального роста популярность беспроводных ЛВС стандарта 802.11b значительно возросла. Появилось много небольших портативных компьютеров со встроенными картами беспроводных ЛВС 802.11b. Компании и университеты установили базовые станции 802.11b на своих территориях, а множество кафе, аэропортов и отелей для повышения своей привлекательности предлагают беспроводный доступ, часто бесплатный.

Для обеспечения более высокой скорости передачи данных, чем в стандарте 802.11b, были разработаны еще два дополнительных стандарта семейства 802.11. Стандарт беспроводной ЛВС IEEE 802.11a занимает поло-

су шириной 300 МГц в диапазоне U-NII 5 ГГц. Стандарт 802.11a базируется на модуляции нескольких несущих и обеспечивает скорость передачи данных 54 Мбит/с в зоне примерно 30 м. Так как у системы стандарта 802.11a намного шире полоса пропускания и, следовательно, намного больше каналов, чем у 802.11b, она может поддерживать большее число пользователей при большей скорости передачи данных. Сначала были сомнения, не будут ли системы 802.11a значительно дороже, чем системы 802.11b, но в действительности они быстро стали конкурентоспособными по цене. Другой стандарт, 802.11g, имеет ту же самую схему и скорость передачи данных, что и 802.11a, но он работает в диапазоне 2,4 ГГц с зоной около 50 м. Во избежание несовместимости, многие карты беспроводных ЛВС и приемопередатчики беспроводной сети поддерживают все три стандарта.

В Европе развитие беспроводных ЛВС вращается вокруг стандартов HIPERLAN²⁸. Стандарт HIPERLAN/2 похож на стандарт беспроводной ЛВС IEEE 802.11a. В частности, у него аналогичная схема канального уровня, он также действует в полосе частот 5 ГГц, подобно U-NII. Следовательно, у HIPERLAN/2 такая же максимальная скорость передачи данных — около 54 Мбит/с, и та же зона покрытия — приблизительно 30 м, как и у 802.11a. Стандарт HIPERLAN/2 отличается от 802.11a протоколом доступа и встроенной поддержкой «гарантированного качества обслуживания» (QoS).

1.4.4. Региональные беспроводные сети передачи данных

Региональные беспроводные сети передачи данных предоставляют услуги по беспроводной передаче данных высокомобильным пользователям в большой зоне обслуживания. В этих системах данный географический район обслуживается базовыми станциями, установленными на башнях, крышах высоких зданий или в горах. Базовые станции могут соединяться с магистральной проводной сетью проводными или специальными радиорелейными многопролетными линиями.

Первоначально региональные беспроводные сети имели очень низкую скорость передачи данных — ниже 10 кбит/с, которая постепенно выросла до 20 кбит/с. На рынке этих услуг было два основных игрока: компании Motient и Bell South Mobile Data (ранее — RAM Mobile Data). Компания Metricom предоставляла похожие услуги, используя архитектуру, состоящую из большой сети маленьких, недорогих базовых стан-

²⁸ HIPERLAN — high-performance radio LAN — высокоскоростное радио-ЛВС. — *Прим. перев.*

ций с маленькой зоной покрытия. Повышенная эффективность маленьких зон покрытия позволила компании Metricom обеспечить более высокую, чем в других беспроводных системах, скорость передачи данных — до 76 кбит/с. Однако высокая стоимость инфраструктуры Metricom в конечном итоге отбросила компанию на обочину, и система прекратила свою работу. Какая-то часть инфраструктуры была куплена и действует в некоторых зонах, например таких, как сеть Ricochet²⁹.

Сотовая цифровая система пакетной передачи данных CDPD³⁰ предоставляет региональные услуги по беспроводной передаче данных поверх аналоговой сотовой телефонной сети. Система CDPD использует речевые каналы с частотным разделением МДЧР (FDMA) аналоговых систем, так как многие из этих каналов не задействованы из-за роста цифровой сотовой сети. Система CDPD обеспечивает передачу пакетов данных на скорости до 19,2 кбит/с и доступна по всей территории США. Однако, поскольку новые поколения сотовых систем также обеспечивают информационные услуги на более высоких скоростях передачи данных, система CDPD в большинстве случаев вытесняется этими более современными услугами. В целом региональные беспроводные сети передачи данных не были очень успешными. Новые системы, предлагающие широкополосный доступ, могут быть более привлекательными.

1.4.5. Широкополосный беспроводный доступ

Широкополосный беспроводный доступ обеспечивает высокоскоростную беспроводную связь между стационарными точками доступа и многочисленными оконечными устройствами. Эти системы первоначально предназначались для поддержки интерактивных услуг домашнего видео, но затем область применений сместилась в сторону предоставления высокоскоростного доступа (десятки Мбит/с) как в Интернет и «Всемирную паутину», так и в высокоскоростные сети передачи данных для домашнего использования и предпринимательства. В Соединенных Штатах для этих систем было зарезервировано два частотных диапазона: часть спектра 28 ГГц для *местных распределенных систем (LDMS)*³¹ и полоса частот в диапазоне 2 ГГц для *многоканальной распределенной системы* крупных городов — *MMDS*³². Система LDMS представляет собой средство, позволяющее новым поставщикам услуг вступить в конкуренцию на уже сложившемся рынке проводных и беспроводных широкополосных услуг [5, гл. 2.3]. MMDS — это телевизионная система и система связи с зо-

²⁹ Ricochet — Беспроводная сеть доступа к Интернет. — *Прим. перев.*

³⁰ CDPD — Cellular Digital Packet Data. — *Прим. перев.*

³¹ LDMS — Local Multipoint Distribution Service. — *Прим. перев.*

³² MMDS — Multichannel (или Microwave) Multipoint Distribution Service. — *Прим. перев.*

ной покрытия 30–50 км [5, гл. 11.11]. Пропускная способность системы MMDS — более сотни цифровых видео, ТВ-каналов вместе с телефонией и доступом в Интернет. Система MMDS будет конкурировать, главным образом, с существующими кабельными и спутниковыми системами. В Европе разрабатывается стандарт Hiperaccess, схожий с MMDS.

Широкополосная *беспроводная технология* WiMax основана на стандарте IEEE 802.16 [16, 17]. Этот стандарт содержит технические условия для широкополосных систем беспроводного доступа, работающих в частотном диапазоне между 2 и 11 ГГц вне зоны прямой видимости, и в диапазоне между 10 и 66 ГГц — в зоне прямой видимости. Скорость передачи данных составит около 40 Мбит/с для стационарных пользователей и 15 Мбит/с для мобильных пользователей при зоне покрытия в несколько километров. Многие производители небольших портативных компьютеров и персональных электронных книжек PDA³³ планируют встраивать в эти устройства WiMax, благодаря чему можно будет удовлетворить спрос на постоянный доступ в Интернет и обмен электронной почтой из любого места. Система WiMax будет конкурировать с беспроводными ЛВС, услугами сотовых сетей третьего поколения 3G и, возможно, с услугами проводных сетей и цифровыми абонентскими линиями DSL. Способность WiMax бросить вызов этим системам или вытеснить их совсем будет зависеть от сравнительных эксплуатационных характеристик WiMax и ее стоимости, которые еще нужно оценить.

1.4.6. Пейджинговые системы

Пейджинговые системы передают короткие сообщения одновременно с многих высоко расположенных базовых станций или спутников, работая на очень высокой мощности (от сотен ватт до киловатт). Системы с наземными передатчиками обычно размещены в обособленных географических зонах, таких как крупный город или столица, тогда как геосинхронные спутниковые передатчики обеспечивают покрытие в общегосударственном или международном масштабе. В системах обоих типов не требуются ни местные системы управления, ни коммутация, так как пейджинговое сообщение передается по всей зоне покрытия. Высокая сложность и большая мощность пейджинговых передатчиков позволяют использовать несложные карманные пейджинговые приемники, которые могут работать от маломощных маленьких и легких батарей. Кроме того, большая мощность передачи позволяет пейджинговым сигналам легко проникать через стены зданий. Пейджинговые услуги — как сами устройства, так и месячная абонентская плата — стоят меньше, чем услуги

³³PDA — Personal Digital Assistant.

сотовых сетей, хотя это ценовое преимущество в последние годы значительно снизилось из-за падения цен на сотовые услуги. Низкая стоимость, маленькие и легкие приемники, долгое действие батарей и возможность работать практически повсюду как внутри помещений, так и снаружи — вот основные причины популярности пейджинговых устройств.

Первые пейджинговые радиосистемы передавали простейшие аналоговые сообщения, подающие абоненту сигнал, что кто-то пытается с ним связаться. Эти системы требовали ответного звонка по телефону наземной линии связи, чтобы узнать номер абонента, пославшего пейджинговое сообщение. Затем система эволюционировала до возможности послать коротких цифровых сообщений, включая номер телефона и краткий текст, который также посылался владельцу пейджера. Пейджинговые радиосистемы первоначально были очень популярными, только в одних Соединенных Штатах насчитывалось до 50 миллионов абонентов. Однако их популярность начала падать с широким распространением сотовых телефонных систем с конкурентными ценами. В итоге конкуренция с сотовыми телефонами заставила пейджинговые системы предоставить новые возможности, например, ответа (т. е. двусторонней связи). Это потребовало больших изменений в дизайне пейджеров, поскольку теперь возникла необходимость не только принимать, но и передавать сигналы, а расстояние до спутника или базовой станции при передаче может быть очень большим. Пейджинговые компании также объединились с производителями карманных компьютеров, чтобы встраивать пейджинговые функции в эти устройства [18]. Несмотря на эти разработки, рынок пейджинговых устройств значительно сократился, хотя все еще существует рыночная ниша для врачей и представителей других профессий, которые должны быть на связи везде, где бы они ни были.

1.4.7. Спутниковые сети

Коммерческие *спутниковые системы* — еще одна главная составляющая инфраструктуры беспроводных коммуникаций [2, 3]. Геосинхронные системы включают в себя международную систему спутниковой морской связи ИНМАРСАТ³⁴ и систему OmniTRACS. Первая приспособлена в основном для аналоговой передачи речи из удаленных мест. Например, она широко используется журналистами для осуществления прямых репортажей из зон военных конфликтов. Система первого поколения ИНМАРСАТ-А была разработана для больших (с однометровой параболической зеркальной антенной) и довольно дорогих абонентских терминалов. Более со-

³⁴INMARSAT — International Maritime Satellite Organization (Международная организация по морским спутниковым системам). — *Прим. перев.*

временные поколения ИНМАРСАТ используют цифровые средства для получения меньших по размеру и более дешевых абонентских терминалов, размером примерно с портфель. Система OmniTRACS фирмы Qualcomm обеспечивает двустороннюю связь, а также определение местоположения. Система в основном используется для передачи буквенно-цифровых сообщений и определения местоположения при грузоперевозках. Существуют несколько основных трудностей при организации передачи речи и данных через геосинхронные спутники. Чтобы добраться до этих спутников, необходима очень большая мощность. Поэтому абонентские устройства обычно большого размера и громоздки. Кроме того, существует большая задержка при прохождении сигнала туда и обратно; эта задержка довольно заметна при двусторонней связи. Геосинхронные спутники также обладают довольно низкой скоростью передачи данных, менее 10 кбит/с. По этим причинам более подходящими для организации передачи речи и данных считаются *низкоорбитальные спутники LEO*.

Системам со спутниками на низких орбитах LEO необходимо в среднем 30–80 спутников для организации всемирного покрытия, и планы развертывания таких систем были широко распространены в конце 1990-х годов. В этот период была выведена на орбиту одна из наиболее амбициозных систем данного типа — спутниковая группа Iridium. Однако затраты на постройку, вывод на орбиту и содержание этих спутников намного выше, чем стоимость наземных базовых станций. Низкоорбитальные спутниковые системы, конечно, могут дополнить наземные системы связи в малонаселенных областях, а также будут привлекательны для путешественников, которые хотят иметь только один телефонный аппарат и один номер для всемирного роуминга. Однако развитие и снижение стоимости сотовых систем не позволили воплотиться многим амбициозным планам, касающимся широкого распространения речевых и информационных систем на основе спутников-низколетов LEO. В конечном счете, Iridium обанкротился и был расформирован, а большинство других систем так никогда и не было запущено. Исключением из этого списка неудач была низкоорбитальная система Globalstar, которая в настоящее время обеспечивает передачу речи и данных с большой зоной покрытия при скорости передачи данных до 10 кбит/с. Остаются и действуют также и некоторые из спутников Iridium.

Наиболее привлекательной сферой использования спутниковых систем остается транслирование телевизионных и аудиовещательных программ на большие географические районы. В среднем каждый восьмой дом в Америке имеет прямой доступ к спутниковым передачам, а спутниковое радиовещание становится популярной услугой. Подобные аудио- и телевизионные спутники ведут трансляции по всей Европе. Спутниковые

системы лучше всего подходят для радиовещания, так как они покрывают большую территорию и не зависят от задержки воспроизведения. Более того, стоимость системы может погашаться в течение многих лет и многими пользователями, что делает эти услуги конкурентоспособными по стоимости в сравнении с наземными системами передачи развлекательных программ.

1.4.8. Недорогая радиосвязь малой мощности: Bluetooth и ZigBee

Снижение стоимости и потребляемой мощности радиовещания сделало его пригодным для внедрения во многие типы электронных устройств, которые могут использоваться для создания «умных домов», сетей датчиков и других полезных приложений. В развитие этого направления появились два типа систем радиосвязи: Bluetooth и ZigBee.

Стандарт *Bluetooth*³⁵ обеспечивает радиосвязь близкого радиуса действия между беспроводными устройствами и элементарные сетевые возможности. Стандарт Bluetooth базируется на крошечной микросхеме приемопередатчика, которая встраивается в цифровые устройства. В таких устройствах, как сотовые телефоны, небольшие портативные и карманные компьютеры, портативные принтеры и проекторы, а также сетевые узлы доступа, приемопередатчик занимает место соединительного кабеля. Система радиосвязи Bluetooth, в основном, предназначена для связи ближнего радиуса действия, например, от небольшого портативного компьютера до расположенного рядом принтера или от сотового телефона до беспроводной телефонной трубки. Ее нормальный радиус действия — 10 м (при мощности передачи 1 мВт), эта зона действия может быть увеличена до 100 м посредством увеличения мощности передачи до 100 мВт. Система действует в нелицензируемом частотном диапазоне 2,4 ГГц, поэтому она может использоваться по всему миру без оформления каких-либо лицензий. Стандарт Bluetooth предусматривает передачу данных по асинхронному каналу со скоростью 723,2 кбит/с. В этом *режиме*, известном также как «Асинхронный без установления соединения» (ACL³⁶), есть еще и обратный канал со скоростью передачи данных 57,6 кбит/с. Технические условия допускают также организацию до трех синхронных каналов, каждый со скоростью 64 кбит/с. Этот режим, также известный как «Синхронный режим, ориентированный на установление соединения»

³⁵ Стандарт Bluetooth назван по имени Гаральда 1-го Блутуза, короля Дании, правившего в 940 — 985 гг. н.э., который объединил Данию и Норвегию. Bluetooth обрабатывает информацию, объединяя устройства посредством радиосвязи, отсюда и такое название.

³⁶ Asynchronous Connection-Less.

(SCO³⁷), в основном, используется в телефонных приложениях, например в телефонных трубках, но может также использоваться и как информационный канал. В результате эти различные режимы вместе дают скорость около 1 Мбит/с. Маршрутизация потоков асинхронных данных осуществляется с помощью протокола коммутации пакетов, основанного на скачкообразной перестройке частоты (1600 скачков в секунду). Имеется также и протокол коммутации каналов для синхронных данных.

Стандарт Bluetooth использует скачкообразную перестройку частоты для параллельного доступа с разносом несущих в 1 МГц. Обычно в общем диапазоне частот 80 МГц используются до 80 различных частот. В любой момент времени доступна полоса шириной 1 МГц, которую могут одновременно использовать до восьми устройств. Различные логические каналы (различные последовательности перескока частоты) могут одновременно совместно использовать один и тот же частотный диапазон 80 МГц. Конфликты могут происходить, когда устройства в различных пикосетях, находящиеся на различных логических каналах, одновременно запрашивают использование одного и того же перескока частоты. Когда число пикосетей в зоне увеличивается, количество конфликтов также увеличивается, ухудшая характеристики системы.

Стандарт Bluetooth был разработан совместно компаниями 3 Com, Ericsson, Intel, IBM, Lucent, Microsoft, Motorola, Nokia и Toshiba. Сегодня стандарт принят более чем 1300 производителями, и многие виды потребительской электронной продукции имеют встроенный Bluetooth. Сюда входят беспроводные трубки сотовых телефонов, беспроводные разъемы USB или RS232, беспроводные карты PCMCIA и беспроводные компьютерные приставки к телевизору.

Технические условия системы радиосвязи ZigBee³⁸ разработаны для сферы потребления с более низкими ценовыми и энергетическими затратами, чем Bluetooth [19]. Эти технические условия основываются на стандарте IEEE 802.15.4. Система радиосвязи действует в том же диапазоне ISM, что и Bluetooth, и способна объединить в сеть 255 устройств. При этом поддерживается скорость передачи данных до 250 кбит/с с зоной охвата до 30 м. Эти скорости передачи ниже, чем у Bluetooth, но энергопотребление при радиообмене между пользователями значительно меньше, а зона охвата — больше. Назначение системы ZigBee состоит в обеспечении работы радио в течение нескольких месяцев или лет без подзарядки, что необходимо в сетях датчиков и складском учете.

³⁷Synchronous Connection Oriented.

³⁸Название ZigBee происходит от «танца», который медоносные пчелы используют для обмена информацией о вновь найденных источниках пищи с другими членами колонии.

1.4.9. Системы сверхширокополосной радиосвязи

Системы сверхширокополосной радиосвязи UWB³⁹ имеют чрезвычайно широкую полосу пропускания с очень высокими потенциальными скоростями передачи данных [20, 21]. Начало концепции сверхширокополосной связи положил искровой передатчик Маркони, который занимал очень широкий диапазон частот. Однако из-за того, что весь спектр мог занимать один низкоскоростной пользователь, широкополосные системы связи были отвергнуты в пользу более эффективных способов. Повторный интерес к широкополосным средствам связи был спровоцирован решением Федеральной комиссии по связи FCC в 2002 г. разрешить работу устройств UWB поверх существующих пользователей в диапазоне 3,1–10,6 ГГц. Теоретически эта добавка создает помехи всем системам в этом частотном диапазоне, включая безопасность и военные системы, нелицензируемые системы беспроводных ЛВС типа 802.11 и Bluetooth, а также сотовые системы, где операторы заплатили миллиарды долларов за использование указанного спектра. Постановление FCC было довольно противоречивым, учитывая законную заинтересованность этих пользователей в свободном от помех спектре. Для уменьшения влияния UWB на первичных пользователей данного диапазона Федеральная комиссия FCC ввела значительные ограничения на передаваемую мощность. Это, в свою очередь, накладывает ограничения на расстояние между передатчиками и приемниками устройств UWB.

Сверхширокополосная радиосвязь продемонстрировала уникальные преимущества, которые уже давно высоко оценены в радиолокации и электросвязи. Широкополосность создает возможности для более полного использования диапазона. Более того, доступная полоса частот UWB потенциально может обеспечить чрезвычайно высокие скорости передачи данных. Наконец, ограничения по мощности обусловили малый размер устройства и небольшое потребление энергии.

Первоначально системы UWB использовали ультракороткие импульсы с простой амплитудной или позиционной модуляцией. Многолучевое распространение может значительно снизить эффективность таких систем, предложения по уменьшению эффектов многолучевого распространения включают в себя выравнивание и модуляцию на нескольких несущих. Высокоточная и быстрая синхронизация также представляет серьезное испытание для этих систем. Хотя остается много технических проблем, привлекательность технологии UWB вызвала большой интерес к ней как в коммерческих, так и в исследовательских кругах.

³⁹UWB — Ultra wideband.

1.5. Беспроводный спектр

1.5.1. Методы распределения спектра

В большинстве стран есть правительственные агентства, отвечающие за *распределение и контроль использования* диапазона *радиочастот*. В Соединенных Штатах спектр распределяется Федеральной комиссией по связи FCC для коммерческого использования и Бюро управления частотным диапазоном OSM⁴⁰ — для военного использования. Распределение спектра для коммерческих целей в Европе выполняется Европейским институтом телекоммуникационных стандартов ETSI, а во всемирном масштабе — Международным Союзом Электросвязи МСЭ. Правительства решают, какую часть спектра распределить между коммерческими и военными применениями, и это решение динамично связано с потребностями. Исторически сложилось так, что Федеральная комиссия по связи FCC распределяла участки спектра для специального использования и выдавала лицензии на использование этих участков отдельным группам или компаниям. Например, в 1980-х годах FCC выделила частоты в диапазоне 800 МГц для услуг аналоговой сотовой телефонии и на основе ряда критериев выдала лицензии на использование спектров двум операторам в каждой географической зоне. Федеральная комиссия FCC и соответствующие организации в других странах до сих пор распределяют радиочастоты для определенных целей, но сегодня эти частоты обычно выделяются через аукционы по продаже спектра за огромные капиталовложения. Некоторые утверждают, что этот рыночный метод является самым справедливым и эффективным способом правительств распределять ограниченные частотные ресурсы, и что это обеспечивает, кроме того, значительный доход государству; другие считают, что этот механизм душит инновации, ограничивает конкуренцию и мешает развитию технологий. В частности, высокая стоимость спектра подразумевает, что приобрести его могут только крупные компании или корпорации. Более того, большие инвестиции, необходимые на приобретение спектра, замедляют возможность инвестирования в инфраструктуру для развертывания систем и обуславливают высокие начальные цены на услуги для конечного пользователя. В Европе аукционы по продаже спектра 3G, когда несколько компаний в конечном итоге не выполнили свои обязательства, укрепили тем самым позиции противников аукционов по продаже спектра.

Помимо аукционов по продаже спектра, определенные частотные диапазоны оставляются для свободного, нелицензируемого использования с соблюдением ряда особых правил («правил этикета»). Эти правила могут

⁴⁰OSM — Office of Spectral Management. — *Прим. перев.*

касаться особых стандартов электросвязи, уровней мощности и т. д. Цель выделения таких нелицензируемых полос частот заключается в стимулировании инноваций и недорогих разработок. Много чрезвычайно успешных беспроводных систем, включая беспроводные ЛВС, Bluetooth и беспроводные телефоны, работают в нелицензируемых полосах частот. Основная трудность в использовании нелицензируемых частот заключается в том, что их может погубить собственный успех. Если на одной и той же частоте используется много нелицензируемых устройств, находящихся в непосредственной близости друг от друга, то они создают друг другу помехи, что может сделать эту полосу частот непригодной для использования.

Другая альтернатива распределения спектра радиочастот — это системы «второго слоя». Такая система действует в качестве вторичного пользователя частотного диапазона вместе с другими первичными пользователями. Действия вторичных пользователей обычно ограничены, так что первичные пользователи испытывают минимальные мешающие влияния. Это обычно достигается путем ограничения мощности вторичных пользователей из расчета на один герц. Примером такой системы «второго слоя» являются сверхширокополосные системы UWB — нелицензируемые системы, работающие в частотном диапазоне ISM. Принимая во внимания сложность оценки степени влияния на первичных пользователей, такие системы «второго слоя» могут быть чрезвычайно спорными. Однако тенденция распределения спектра для «второго слоя» представляется перспективной, в основном, из-за недостатка свободного спектра для новых систем и приложений.

Спутниковые системы покрывают большие территории, охватывая много стран, а иногда и весь земной шар. Для беспроводных систем, которые охватывают множество стран, спектр распределяется Рабочей Группой сектора радиосвязи *Международного Союза Электросвязи* — МСЭ-Р. *Отдел стандартизации* этой организации, МСЭ-Т, принимает телекоммуникационные стандарты для международных систем, которые должны взаимодействовать между собой через национальные границы.

В настоящее время среди органов регулирования по всему миру наблюдается движение к изменению способа распределения спектра. Действительно, основной механизм распределения спектра серьезно не менялся с момента зарождения органов регулирования в начале и середине 1900-х годов, хотя аукционы по продаже спектра и системы «второго слоя» — относительно новые явления. Целью изменения политики распределения спектра является возможность воспользоваться преимуществами технических достижений в радиотехнике, чтобы сделать распределение спектра более эффективным и гибким. Одна из блестящих идей — понятие об «умном» или «когнитивном» радио. Радио такого типа может

«чувствовать» свое спектральное окружение и определять временные, пространственные и частотные области, где оно не будет оказывать мешающее влияние на других пользователей даже при умеренных и высоких уровнях передаваемой мощности. Если бы такие типы радио смогли действовать в широком частотном диапазоне, то это открыло бы большие перспективы новых частотных диапазонов и новых беспроводных систем и приложений. Однако нужно преодолеть множество технологических и политических препон, чтобы допустить такие радикальные изменения в распределении спектра.

1.5.2. Распределение спектра частот в существующих системах

Многие беспроводные приложения работают в радиодиапазоне частот между 30 и 40 МГц. Эти частоты естественны для беспроводных систем, потому что на них не оказывает влияние кривизна Земли, им необходимы только антенны средних размеров, и они могут проходить сквозь ионосферу. Примечательно, что требуемый для хорошего приема размер антенны обратно пропорционален частоте сигнала, поэтому для систем на высоких частотах нужны более компактные антенны. Однако мощность сигнала ненаправленных антенн обратно пропорциональна квадрату частоты, поэтому сигналами более высоких частот сложнее обеспечить покрытие больших площадей.

Как уже было сказано в предыдущем разделе, спектр выделяется в лицензионных полосах частот (которые регулирующие органы выделяют для отдельных операторов) или в нелицензируемых полосах (которые могут использоваться любыми субъектами рынка в соответствии с определенными системными требованиями). В табл. 1.1 показано распределение лицензионного спектра для основных коммерческих беспроводных систем, работающих в настоящее время в США. Похожее распределение существует в Европе и Азии.

Примечательно, что цифровому телевидению выделены те же самые частотные полосы, что и телевизионному вещанию, так что все станции телевизионного вещания со временем должны перейти от аналоговой передачи к цифровой. Широкополосный беспроводный спектр 3G в настоящее время выделен в телеканалах 60–69 УКВ, но предполагается его перераспределение. Аналоговые сотовые системы 1G и цифровые системы 2G занимают один и тот же диапазон 800 МГц, и поставщики услуг сотовой связи решают, как распределить этот спектр между цифровыми и аналоговыми системами.

Нелицензируемый спектр распределяется правительственными органами внутри каждой страны. Часто разные страны стараются согласо-

вызвать свои планы распределения частот для нелицензируемого использования таким образом, чтобы технологические разработки для этого спектра были совместимы во всем мире. В табл. 1.2 показано распределение нелицензируемого спектра в Соединенных Штатах.

Таблица 1.1. Распределение лицензионного спектра в США

Услуга/система	Диапазон частот
АМ радио	535–1605 кГц
ЧМ радио	88–108 МГц
ТВ вещание (каналы 2–6)	54–88 МГц
ТВ вещание (каналы 7–13)	174–216 МГц
ТВ вещание (УКВ)	470–806 МГц
Беспроводный широкополосный доступ	746–764 МГц, 776–794 МГц
Беспроводный широкополосный доступ 3G	1,7–1,85 ГГц, 2,5–2,69 ГГц
Цифровая сотовая телефония 1G и 2G	806–902 МГц
Персональные системы связи (сотовая телефония 2G)	1,85–1,99 ГГц
Беспроводные службы связи	2,305–2,32 ГГц, 2,345–2,36 ГГц
Спутниковое цифровое радио	2,32–2,325 ГГц
Многоканальная многоточечная распределенная служба связи (MMDS*)	2,15–2,68 ГГц
Цифровое спутниковое вещание (спутниковое ТВ)	12,2–12,7 ГГц
Местная многоточечная распределенная служба связи (LMDS**)	27,5–29,5 ГГц, 31–31,3 ГГц
Стационарные беспроводные службы	38,6–40 ГГц

*MMDS — Multichannel Multipoint Distribution Service

**LMDS — Local Multipoint Distribution Service

Таблица 1.2. Распределение нелицензируемого спектра в США

Частотная полоса	Частота
1 полоса ISM (беспроводные телефоны, 1G WLAN)	902–928 МГц
2 полоса ISM (Bluetooth, 802.11b и 802.11g WLAN)	2,4–2,4835 ГГц
3 полоса ISM (беспроводные УАТС)	5,725–5,85 ГГц
1 полоса U-NII (внутренние системы, 802.11a WLAN)	5,15–5,25 ГГц
2 полоса U-NII (внешние системы ближнего радиуса действия, 802.11a WLAN)	5,25–5,35 ГГц
3 полоса U-NII (внешние системы дальнего радиуса действия, 802.11a WLAN)	5,725–5,825 ГГц

В первой полосе ISM лицензированные пользователи ведут передачу с высокой мощностью, что оказывает отрицательное воздействие на нелицензируемых пользователей. Поэтому требования для нелицензируемого использования в этой полосе чрезвычайно ограничены, а эксплуатаци-

онные показатели довольно слабые. Вторая полоса ISM в сумме имеет 300 МГц спектра (три отдельные полосы по 100 МГц), при этом ограничения по мощности в различных полосах несколько отличаются. В этих полосах работают многие нелицензируемые системы.

1.6. Стандарты

Взаимодействующие друг с другом системы связи нуждаются в стандартизации. Стандарты обычно принимаются национальными или международными комитетами. В США эту роль исполняет Ассоциация промышленности средств связи — TIA⁴¹. Эти комитеты принимают и стандарты, разработанные другими организациями. Институт IEEE является главным действующим лицом в деле стандартизации в Соединенных Штатах, тогда как институт ETSI выполняет эту роль в Европе. Обе группы идут очень долгим путем разработки стандартов, которые затем принимаются компаниями и другими заинтересованными сторонами, а также занимаются составлением детальных отчетов. Процесс стандартизации является долгосрочным инвестированием, но компании участвуют в нем, так как включение их идей в стандарт дает им преимущество в разработке конечной системы. Вообще, стандарты не содержат всех деталей по всем аспектам разработки системы. Это позволяет компаниям вводить новшества и отличать свою продукцию от других стандартизованных систем. Основная цель стандартизации — это обеспечение возможностей взаимодействия различных систем.

Кроме обеспечения взаимодействия, стандарты позволяют экономить ресурсы и снижать стоимость. Например, беспроводные ЛВС обычно действуют в нелицензируемых частотных диапазонах, поэтому им не нужно следовать определенным стандартам. Первое поколение беспроводных ЛВС было нестандартизованным, поэтому для многих систем нужны были специализированные компоненты, что вело к значительному росту стоимости, а в сочетании с плохими эксплуатационными показателями привело к ограниченному применению. Этот опыт нашел свое отражение в настойчивой поддержке стандартизации следующего поколения беспроводных ЛВС, результатом чего стало очень удачное семейство стандартов IEEE 802.11.

Конечно, у стандартизации есть и свои недостатки. Процесс стандартизации не безупречен, так как у компаний-участниц есть свои собственные намерения, которые не всегда совпадают с лучшими технологиями или интересами потребителей. Кроме того, процесс стандартизации дол-

⁴¹TIA — Telecommunications Industry Association.

жен завершиться в какой-то точке, после которой становится все сложнее добавлять новшества и совершенствовать существующий стандарт. Наконец, процесс стандартизации может стать довольно политизированным. Это случилось со вторым поколением сотовых телефонов в Соединенных Штатах и в конечном итоге привело к принятию двух различных стандартов, что почти «оксюморон» (т. е. сочетание несочетаемого). Ставшие результатом этого запаздывание и технологический раскол значительно задержали США в развитии второго поколения сотовых систем по сравнению с Европой. Несмотря на промахи, стандартизация является очевидной необходимостью и составляющей, часто приносящей пользу при разработке и эксплуатации беспроводных систем. Однако чтобы такую пользу могли извлечь все участники рынка беспроводных технологий, необходимо решить ряд проблем в области стандартизации.

Задачи

- 1.1. С увеличением емкости устройств хранения информации мы можем сохранять все большее и большее количество информации на все меньших и меньших устройствах. Действительно, мы можем представить себе микроскопические компьютерные микросхемы, которые сохраняют терабиты информации. Предположим, что эта информация должна быть передана на какое-то расстояние. Проанализируйте плюсы и минусы размещения большого количества этих запоминающих устройств на грузовик (подвижную станцию) и транспортировки их в пункт назначения вместо отправки этой информации в электронном виде.
- 1.2. Опишите два технических преимущества и недостатка беспроводных систем, использующих пульсирующую передачу данных вместо непрерывной передачи данных.
- 1.3. Вероятность ошибки по битам в волоконно-оптическом кабеле обычно равна $P_b = 10^{-12}$. При использовании в беспроводной связи относительной фазовой манипуляции ОФМН (DPSK) эта вероятность равна $P_b = 1/2\bar{\gamma}$, где $\bar{\gamma}$ — среднее отношение сигнал–шум (SNR). Найдите среднее значение SNR, необходимое для получения в беспроводном канале такой же вероятности P_b , как и в волоконно-оптическом кабеле. Так как требуется чрезвычайно высокое отношение сигнал–шум, то беспроводные каналы обычно имеют P_b намного больше 10^{-12} .
- 1.4. Найдите величину задержки при передаче информации между спутником и Землей для спутников с низкой, средней и геостационарной орбитами (LEO, MEO и GEO), принимая скорость света равной $3 \cdot 10^8$ м/с. Если максимально допустимая задержка для системы передачи речи составляет 30 мс, какая из этих спутниковых систем будет приемлемой для двусторонней речевой связи?

- 1.5. Какие приложения могли бы значительно увеличить спрос на беспроводную информацию?
- 1.6. Эта задача иллюстрирует некоторые экономические проблемы, с которыми сталкиваются поставщики услуг, когда они отходят от исключительно речевых систем к системам со смешанными средствами связи. Предположим, что Вы — такой поставщик услуг, работающий с полосой частот 120 кГц, которую необходимо распределить между пользователями телефонной связи и передачей данных. Для пользователей речевой связи необходимо 20 кГц частотного диапазона, а для пользователей передачи данных — 60 кГц диапазона. Итак, например, Вы могли бы выделить весь Ваш диапазон частот для телефонии, получив в результате шесть речевых каналов, или разделить частотный диапазон на один информационный канал и три речевых канала и т. д. Предположим далее, что это система с временным разделением, временные интервалы имеют длительность T . Все запросы на соединения по всем речевым каналам и каналам передачи данных поступают в начале временного интервала, и в обоих случаях вызовы длятся T секунд. Предположим, в системе существуют шесть независимых речевых пользователей: каждый из этих пользователей запрашивает телефонный канал с вероятностью 0,8 и платит 20 долларов, если его вызов был осуществлен. Пусть в системе будут два независимых пользователя передачи данных: каждый из этих пользователей запрашивает канал с вероятностью 0,5 и платит 1 доллар, если его вызов был осуществлен. Как следует распределить свой частотный диапазон, чтобы максимизировать предполагаемую выручку?
- 1.7. Опишите три недостатка использования беспроводной ЛВС вместо проводной ЛВС. Для каких приложений эти недостатки будут перевешены преимуществами беспроводной мобильности? Для каких приложений эти недостатки будут доминировать над преимуществами?
- 1.8. Сотовые системы переместились в сторону использования более маленьких сот, чтобы увеличить свою пропускную способность. Назовите минимум три спорных вопроса при использовании маленьких сот, которые усложняют разработку системы при такой тенденции?
- 1.9. Почему минимизация расстояния повторного использования частоты максимизирует эффективность использования спектра сотовой системы?
- 1.10. Эта задача демонстрирует увеличение емкости системы при уменьшении размера сот. Рассмотрим квадратный город площадью в 100 кв.км. Предположим, Вы разрабатываете сотовую систему для этого города с квадратными ячейками, где каждая ячейка (вне зависимости от ее размера) имеет 100 каналов и таким образом может поддерживать 100 активных пользователей. (На практике количество пользователей, которые могут обслуживаться каждой ячейкой, в основном, не зависит от размера ячейки при условии соответствия модели распространения и шкалы мощности.)
- а) Каково полное количество активных пользователей, которых система может обслуживать при размере ячейки в 1 кв.км?

- б) Какой размер ячейки Вы бы использовали, если бы Ваша система должна была поддерживать 250 000 активных пользователей?

Теперь рассмотрим некоторые финансовые следствия, основанные на том факте, что пользователи не разговаривают постоянно. Примем, что пятница с 17 до 18 ч — самое напряженное время для пользователей сотовых телефонов. В течение этого времени средний пользователь делает один вызов, и продолжительность этого вызова составляет две минуты. Ваша система должна быть построена таким образом, чтобы вероятность блокировки вызова абонента в течение этого часа пик была не более 2 %. (Вероятная блокировка рассчитывается с использованием формулы Эрланга: $P_b = (A^C/C!)/(\sum_{k=0}^C A^k/k!)$, где C — количество каналов, а $A = U\mu H$, где U — количество пользователей, μ — среднее количество запросов за единицу времени на одного пользователя, а H — средняя продолжительность вызова [5, гл. 3.6].

- в) Сколько всего абонентов могут поддерживать макросотовая система (с размером ячейки в 1 кв.км) и микросотовая система (с размером ячейки, полученным в пункте б))?
- г) Если базовая станция стоит 500 000 долл., какова стоимость базовых станций для каждой системы?
- д) Если ежемесячная абонентская плата в каждой системе составляет 50 долл., какова будет ежемесячная выручка в каждом случае? Сколько потребуется времени, чтобы окупилась затраты на инфраструктуру (базовые станции) для каждой системы?
- 1.11. Сколько каналов передачи данных потребуется системе CDPD для достижения такой же скорости передачи данных, как средняя скорость WiMax?

Литература

1. V. H. McDonald, «The cellular concept», *Bell System Tech. J.*, pp. 15–49, January 1979.
2. F. Abrishamkar and Z. Siveski, «PCS global mobile satellites», *IEEE Commun. Mag.*, pp. 132–6, September 1996.
3. R. Ananasso and F. D. Priscoli, «The role of satellites in personal communication services», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, pp. 180–96, February 1995.
4. D. C. Cox, «Wireless personal communications: What is it?» *IEEE Pers. Commun. Mag.*, pp. 20–35, April 1995.
5. T. S. Rappaport, *Wireless Communications — Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2001.
6. W. Stallings, *Wireless Communications and Networks*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2005.
7. K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, *Principles of Wireless Networks: A Unified Approach*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2002.

8. A. J. Goldsmith and L. J. Greenstein, «A measurement-based model for predicting coverage areas of urban microcells», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, pp. 1013–23, September 1993.
9. K. S. Gilhousen, I. M. Jacobs, R. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, Jr., and C. E. Wheatley III, «On the capacity of a cellular CDMA system», *IEEE Trans. Veh. Tech.*, pp. 303–12, May 1991.
10. K. Rath and J. Uddenfeldt, «Capacity of digital cellular TDMA systems», *IEEE-Trans. Veh. Tech.*, pp. 323–32, May 1991.
11. Q. Hardy, «Are claims hope or hype?» *Wall Street Journal*, p. A1, September 6, 1996.
12. A. Mehrotra, *Cellular Radio: Analog and Digital Systems*, Artech House, Norwood, MA, 1994.
13. J. E. Padgett, C. G. Gunther, and T. Hattori, «Overview of wireless personal communications», *IEEE Commun. Mag.*, pp. 28–41, January 1995.
14. J. D. Vriendt, P. Laine, C. Lerouge, and X. Xu, «Mobile network evolution: A revolution on the move», *IEEE Commun. Mag.*, pp. 104–11, April 2002.
15. P. Bender, P. J. Black, M. S. Grob, R. Padovani, N. T. Sindhushayana, and A. J. Viterbi, «CDMA/HDR: A bandwidth efficient high speed wireless data service for nomadic users», *IEEE Commun. Mag.*, pp. 70–7, July 2000.
16. S. J. Vaughan-Nichols, «Achieving wireless broadband with WiMax», *IEEE Computer*, pp. 10–13, June 2004.
17. S. M. Cherry, «WiMax and Wi-Fi: Separate and Unequal», *IEEE Spectrum*, p. 16, March 2004.
18. S. Schiesel, «Paging allies focus strategy on the Internet», *New York Times*, April 19, 1999.
19. I. Poole, «What exactly is... ZigBee?» *IEEE Commun. Eng.*, pp. 44–5, August/September 2004.
20. L. Yang and G. B. Giannakis, «Ultra-wideband communications: An idea whose time has come», *IEEE Signal Proc. Mag.*, pp. 26–54, November 2004.
21. D. Porcino and W. Hirt, «Ultra-wideband radio technology: Potential and challenges ahead», *IEEE Commun. Mag.*, pp. 66–74, July 2003.