



# МИР радиоэлектроники

Константин А. Баланис  
Панайотис И. Иоанидес

Введение в смарт-антенны

Перевод с английского  
К.В. Юдинцева

под редакцией  
В.В. Попова,  
М.Д. Парнеса

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2012

УДК 621.396.67  
ББК 32.84  
Б20

Издание осуществлено при поддержке  
ЗАО «Светлана-Электронприбор»

**Б20 Баланис Константин А., Иоанидес Панайотис И.**

**Введение в смарт-антенны**

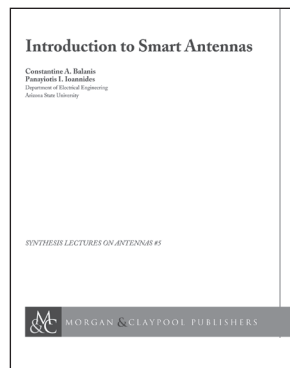
**Москва: Техносфера, 2012. – 200 с., ISBN 978-5-94836-312-7**

По мере увеличения спроса на системы подвижной связи возникает необходимость в увеличении зоны обслуживания, пропускной способности и более высокого качества передачи данных. Интеллектуальные (смарт) антенные системы предлагают эффективное решение проблем, имеющихся у современных систем беспроводной связи.

Цель данной книги — дать читателю максимально развернутое представление по системным аспектам смарт-антенн: приведен обзор принципов смарт-систем с включением ряда областей, имеющих большое влияние на них, исследуется вопрос, как взаимодействие и интеграция последних может влиять на специализированные сети мобильной связи MANET (Mobile Ad-hoc Network), приводятся общие принципы и главные преимущества использования пространственно-временной обработки, особенно систем с несколькими входами и выходами MIMO (Multi-Input-Multi-Output).

Издание станет ценным справочником для студентов и аспирантов, инженеров, IT-директоров и руководителей соответствующих подразделений, а также всех специалистов, работающих в области беспроводной связи.

УДК 621.396.67  
ББК 32.84



Original English language edition published by Morgan and Claypool publishers  
Copyright © 2011 Morgan and Claypool Publishers  
All Rights Reserved Morgan and Claypool Publishers

© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера», перевод на русский язык,  
оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-312-7

ISBN 978-159829176-6(англ.)

# Содержание

<b>Содержание</b> .....	<b>5</b>
<b>Краткое содержание</b> .....	<b>8</b>
<b>Ключевые слова</b> .....	<b>8</b>
<b>Предисловие редакторов перевода</b> .....	<b>9</b>
<b>Глава 1. Вступление</b> .....	<b>11</b>
<b>Глава 2. Обзор мобильной связи</b> .....	<b>14</b>
2.1. Общее описание.....	14
2.2. Обзор сотовой связи.....	15
2.3. Эволюция систем мобильной телефонной связи.....	16
2.4. Структура.....	18
2.5. Радиосистемы сотовой связи: концепции и эволюция.....	20
2.5.1. Всенаправленные системы и многократное использование канала.....	20
2.5.2. Секционирование сот.....	22
2.5.3. Секционированные системы.....	22
2.6. Регулирование мощности.....	24
2.6.1. Эффективность использования выделенного частотного спектра.....	25
2.7. Схемы коллективного доступа.....	27
2.7.1. Множественный доступ с разделением частот FDMA.....	27
2.7.2. Множественный доступ с временным разделением каналов TDMA.....	28
2.7.3. Множественный доступ с кодовым разделением каналов CDMA.....	29
2.7.4. Ортогональное частотное разделение каналов OFDM с мультиплексированием.....	31
<b>Глава 3. Антенные решетки и способы разнесенного приема</b> .....	<b>33</b>
3.1. Антенные решетки.....	33
3.2. Классификация антенн.....	34
3.2.1. Изотропные излучатели.....	34
3.2.2. Всенаправленные антенны.....	34
3.2.3. Направленные антенны.....	35
3.2.4. Фазированные антенные решетки.....	36
3.2.5. Адаптивные антенные решетки AP.....	36
3.3. Методы разнесенного приема.....	38
<b>Глава 4. Смарт-антенны</b> .....	<b>46</b>
4.1. Вступление.....	46
4.2. Необходимость в смарт-антеннах.....	46
4.3. Обзор.....	48
4.4. Конфигурации адаптивных антенн.....	50
4.4.1. Антенны с коммутацией луча.....	53
4.4.2. Адаптивные антенные системы.....	56
4.5. Множественный доступ с пространственным разделением каналов SDMA.....	60
4.6. Архитектура смарт-антенной системы.....	63
4.6.1. Приемная часть.....	63
4.6.2. Передающая часть.....	66

4.7. Преимущества и недостатки.....	68
4.8. Основные принципы.....	71
4.9. Эффекты взаимной связи.....	80
<b>Глава 5. Определение направления на источник сигнала. Основные положения.....</b>	<b>84</b>
5.1. Введение.....	85
5.2. Вектор отклика антенной решетки.....	86
5.3. Модель принятого сигнала.....	88
5.4. Подпространственная модель данных.....	91
5.5. Автоковариационные матрицы сигнала.....	93
5.6. Традиционные методы определения направления прихода сигнала.....	95
5.6.1. Стандартный метод формирования ДН.....	95
5.6.2. Метод наименьшей вариации Кейпона.....	96
5.7. Подпространственный подход оценки угла прихода сигнала.....	97
5.7.1. Алгоритм MUSIC.....	97
5.7.2. Алгоритм ESPRIT.....	100
5.8. Однозначность оценки углов прихода.....	103
<b>Глава 6. Принципы формирования ДН.....</b>	<b>105</b>
6.1. Классическое формирование ДН.....	107
6.2. Статистически оптимальные весовые вектора формирования ДН.....	108
6.2.1. Формирователь луча с максимальным SNR.....	109
6.2.2. Устройство подавления боковых лепестков и формирователь ДН с максимальным SINR.....	110
6.2.3. Минимальная среднеквадратическая ошибка MMSE.....	111
6.2.4. Прямое обращение матрицы DMI.....	113
6.2.5. Минимальная вариация с линейным ограничением LCMV.....	114
6.3. Адаптивные алгоритмы формирования ДН.....	116
6.3.1. Алгоритм наименьшего среднеквадратичного отклонения LMS.....	117
6.3.2. Рекурсивный алгоритм наименьших квадратов RLS (Recursive Least-Squares).....	119
6.3.3. Алгоритм для сигналов с постоянной амплитудой CM (Constant-Modulus).....	121
6.3.4. Алгоритм аффинной проекции AP (Affine-Projection).....	123
6.3.5. Квазиньютоновский алгоритм QN (Quasi-Newton).....	124
<b>Глава 7. Интеграция и моделирование смарт-антенн.....</b>	<b>126</b>
7.1. Обзор.....	126
7.2. Разработка антенны.....	127
7.3. Взаимная связь.....	129
7.4. Адаптивные алгоритмы обработки сигнала.....	130
7.4.1. Направление прихода.....	130
7.4.2. Адаптивное формирование ДН.....	132
7.4.3. Формирование ДН и сложение разнесенных сигналов в каналах с релейевским замиранием.....	133
7.5. Решетчатое кодирование для адаптивных решеток TCM (trellis-coded modulation).....	135
7.6. Смарт-антенные системы для MANET-сетей.....	137
7.6.1. Протокол.....	138
7.6.2. Моделирование.....	139

7.7. Пояснения.....	143
<b>Глава 8. Пространственно-временная обработка.....</b>	<b>145</b>
8.1. Вступление.....	145
8.2. Модели сигнала и дискретного пространственно-временного канала.....	151
8.3. Пространственно-временное формирование луча.....	155
8.4. Подавление межсимвольных и внутриканальных помех.....	157
8.4.1. Подавление межсимвольных помех ISI.....	158
8.4.2. Подавление внутриканальных помех CCI.....	159
8.4.3. Одновременное подавление межсимвольной и внутриканальной помехи.....	159
8.5. Пространственно-временная обработка для DS-CDMA.....	160
8.6. Пропускная способность и скорость передачи данных в MIMO-системах.....	161
8.6.1. Ограничения скорости передачи для одного пользователя.....	163
8.6.2. Предел скорости передачи при коллективном использовании канала.....	163
8.6.3. Ограничения скорости передачи данных в сотовой системе.....	166
8.6.4. MIMO-система в сетях WLAN.....	168
8.7. Заключение.....	172
<b>Глава 9. Коммерческая доступность смарт-антенн.....</b>	<b>173</b>
<b>Глава 10. Заключение.....</b>	<b>180</b>
<b>Благодарности.....</b>	<b>181</b>
<b>Литература.....</b>	<b>182</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>196</b>

## Краткое содержание

По мере увеличения спроса на системы подвижной связи, возникает необходимость в увеличении зоны обслуживания, пропускной способности и более высоком качестве передачи данных. Таким образом, необходимо более эффективное использование выделенного частотного спектра. Интеллектуальные (смарт) антенные системы предлагают эффективное решение проблем, имеющих у сегодняшних систем беспроводной связи, и способны обеспечить более эффективное использование радиоспектра и каналы надежной высокоскоростной передачи данных. Цель данной книги состоит в том, чтобы дать читателю максимально развернутое представление по системным аспектам смарт-антенн. Фактически техника смарт-антенных систем включает ряд важных областей, таких как индивидуальное проектирование антенных решеток, алгоритмов обработки сигналов, пространственно-временная обработка, моделирование беспроводного канала и кодирование и быстродействие радиосетей. В данной книге дается обзор принципов смарт-систем с включением ряда областей, имеющих на них большое влияние, а также исследуется вопрос, как взаимодействие и интеграция последних могут влиять на специализированные сети мобильной связи MANET (Mobile Ad-Hoc Network). Кроме того, приводятся общие принципы и главные преимущества использования пространственно-временной обработки особенно систем с несколькими входами и выходами MIMO (Multi-Input-Multi-Output).

### Ключевые слова

Адаптивные решетки, антенны с коммутируемым лучом, фазированная решетка, SDMA, взаимная связь, направление прихода сигнала, адаптивное формирование луча, канальное кодирование, MANET, пропускная способность сети, пространственно-временная обработка.

## Предисловие редакторов перевода

Константин Баланис, профессор Арizonского университета, известен как автор одной из самых удачных книг по теории антенн, рекомендованных в качестве учебного пособия в университетах США и Европы<sup>1</sup>. Предлагаемая новая книга представляет собой введение в технику и теорию нового поколения современных антенных решеток, оснащенных процессорной обработкой сигнала.

Начало таких работ было сделано в военной технике, но достижения военной электроники и технологии находят свое применение и в гражданских приложениях. Можно назвать и обратную ситуацию, когда новые схемы из гражданской промышленности активно развились и воплотились в целое направление военной электроники. Так, например, было с первой фазированной антенной решеткой, созданной в США русским ученым С.А. Шелкуновым, с помощью которой была решена проблема замирания радиосигналов (фединг). Антенна содержала решетку излучателей, управляемые фазовращатели и сумматор радиосигнала. В последующие десятилетия это направление — фазированные антенные решетки — активнейшим образом стало использоваться в военных радарх и системах связи. Сейчас эти идеи возвращаются в аппаратуру широкого применения: мобильные телефоны, системы беспроводного доступа в интернет и так далее. Первая монография, посвященная адаптивным антенным решеткам<sup>2</sup>, вышла на русском языке в 1991 г. Ее автором был ведущий специалист по антенной технике в СССР — А.А. Пистолькорс. Предлагаемый читателю перевод книги К. Баланиса посвящен современным разделам антенной техники — адаптивными антенным решеткам, или смарт-антеннам.

«Смарт-антенна» — это американский технический жаргон. К сожалению, мы не нашли подходящего русского эквивалента этому термину и, таким образом, вводим этот технический термин и в русскую техническую литературу. В монографии К. Баланиса излагаются основы построения смарт-антенн. В ней дан обзор практически всех работ, опубликованных за рубежом. Прекрасная библиография из 232 источников поможет заинтересованным инженерным и научным работникам быстро освоить достижения в этой области антенной техники, используемые алгоритмы управления сигнальными процессорами в антенных системах и их математическое обеспечение.

Создание ФАР в середине прошлого века дало огромный толчок к развитию высокочастотной элементной базы: фазовращателей, аттенюаторов, мало-

---

<sup>1</sup> Constantine A. Balanis, «Advanced Engineering Electromagnetics», John Wiley & Sons, Inc., 1, 1989.

<sup>2</sup> А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов, «Введение в теорию адаптивных антенн» М.: Наука, стр. 200, 1991

габаритных усилителей, ферритовых устройств и т. д. Для широкого внедрения смарт-антенн потребуются эти же устройства, но уже в интегральном исполнении, а также сигнальные процессоры, которые являются, пожалуй, основной частью адаптивных антенных решеток. Внедрение таких антенн в различные системы связи, как наземные, так и спутниковые, позволит достичь нового качественного и количественного уровня в скорости передачи цифровых данных, борьбы с пассивными и активными помехами, что в условиях все более сложной эфирной обстановки становится очень актуальным.

В России пока немного компаний занимается проектированием базовых станций, интернет-терминалов и мобильных телефонов и, видимо, у этой книги не будет массового читателя. Но, как это уже неоднократно было в технике, достижения из гражданских систем могут внедряться и в военные станции, оборудование для полиции, для систем глобального позиционирования, везде, где используются антенные решетки. Активность российских инженеров, поддержка государством наукоемких областей позволяют надеяться на то, что отечественная гражданская электроника выйдет в скором времени на международный рынок. В различных исследовательских центрах России ведутся разработки базовых станций WiMaX, навигационной системы ГЛОНАСС, систем беспроводного доступа в интернет. Эта книга станет подспорьем в проектировании современных антенн для этих радиосистем.

*Парнес Михаил Давидович, Попов Владимир Васильевич*



# ГЛАВА I

## ВСТУПЛЕНИЕ

В последние годы наблюдается существенное развитие беспроводных технологий широкополосного доступа, направленных на улучшение качества услуг беспроводного интернета и систем сотовой связи [1]. Из-за этого в будущем предвидится огромный рост нагрузки на линии мобильной и персональной связи [2]. Он обусловлен как ростом количества пользователей, так и появлением услуг высокоскоростной передачи данных. Такая тенденция наблюдается для систем второго поколения и наверняка перейдет на системы третьего поколения. Рост объема передаваемой информации потребует как от производителей оборудования, так и поставщиков услуг обеспечения достаточно высокой пропускной способности сетей [3]. Так как предел пропускной способности обусловлен рядом ограничивающих факторов излучающей среды, решение данной задачи становится критически важным для поставщиков услуг [4].

Главной причиной уменьшения пропускной способности являются межканальные помехи, обусловленные ростом количества пользователей. К другим факторам снижения производительности системы и ее пропускной способности относятся интерференционное замирание и задержки в распространении, обусловленные отражением сигнала от зданий и рельефом местности, а также мобильностью пользователей. Вопрос пропускной способности обострился в 90-х годах, когда Интернет дал возможность получать данные по запросу (котировки акций, новости, метеосводки, электронная почта и т. д.) и обмениваться информацией в реальном времени. Это привело к увеличению использования эфирного времени и количества абонентов и, таким образом, к насыщению пропускной способности системы.

Операторы мобильной связи стали искать новые способы максимального увеличения эффективности использования выделенных частотных спектров своих сетей и увеличения рентабельности [5]. В настоящее время во всем мире ведутся исследования, направленные на улучшение производительности беспроводных систем. Внедрение современной технологии смарт-антенн (SA) беспроводной связи обещает реализацию высокоэффективных сетей с максимальной пропускной способностью, улучшение качества услуги и расширение зоны покрытия [6]. Смарт-антенны в последние годы пользуются заслуженным вниманием [6—11] в связи с тем, что они могут повысить пропускную способность (очень важный фактор в городских условиях и плотно заселенных районах) за счет динамической отстройки от помехи с одновременной фокусиров-

кой на необходимом абоненте [12, 13], вкуче с впечатляющими улучшениями в области цифровой обработки сигнала.

Избирательные управляющие алгоритмы с predetermined критериями обеспечивают адаптивные решетки уникальной способностью к изменению характеристик диаграммы направленности (нулей, уровней боковых лепестков, направленности основного лепестка и его ширины). Эти управляющие алгоритмы обязаны своим появлением сразу нескольким дисциплинам и предназначены для использования в конкретных областях применения (например в сейсмологии, подводных работах, воздушно-космическом пространстве и в последнее время — в сотовой связи) [14]. Коммерческое внедрение SA обещает большой прирост системной производительности с точки зрения пропускной способности, зоны покрытия и качества сигнала, что в целом, в конечном итоге, приведет к повышению эффективности использования выделенного частотного спектра [14].

По мере роста необходимости в обмене и коллективном использовании данных, пользователи, где бы они ни находились — на работе, дома или в движении, требуют обеспечить им возможность подключения к быстрым сетям с большой зоной обслуживания. Более того, пользователи также заинтересованы в возможности по желанию устанавливать соединения между всеми их персональными электронными устройствами PED (personal electronic devices) в режиме *ad hoc* (для данного случая — в пер. с латыни). Сеть такого типа получила название самоконфигурируемой мобильной специальной сети (MANET) и начинает появляться на основе технологии беспроводной связи Bluetooth.

Bluetooth™ представляет собой радиосвязь малого радиуса действия (10—100 м), обеспечивающую возможность создания канала связи и обмена данными между двумя или более устройствами [15, 16]. Так как в Bluetooth™ используется всенаправленная антенна для работы в промышленном, научном и медицинском диапазоне ISM (industrial, scientific, and medical — нелицензируемая полоса 2,4 ГГц), то она не способна обеспечить наведение на абонентов и регулировать степень чистоты сигнала для снижения помех. Все это ограничивает общую производительность системы, то есть пропускную способность MANET-сетей. Кроме того, так как всенаправленная антенна излучает энергию во всех направлениях, снижается время автономной работы персональных электронных устройств. Следовательно, преимущества, предлагаемые адаптивными антеннами, должны обеспечить улучшение общей производительности MANET-сетей [17].

Существующие тенденции сосредоточены на пространственно-временной обработке и кодировании цифрового сигнала, то есть перспективной технологии, обещающей значительное увеличение производительности беспроводных сетей за счет использования многоэлементных антенн для передачи и приема [18]. Пространственно-временная обработка может рассматриваться

в качестве эволюции традиционных методов обработки сигнала с помощью антенных решеток и формирования диаграммы направленности. Импульсные сигналы обрабатываются одновременно на многих датчиках с помощью приемников пространственно-временной обработки, таким образом, улучшающих разрешающую способность, подавление помехи и качество услуги. Реализация сложных методов пространственно-временной обработки сигнала в системах с многоканальным входом и выходом (MIMO) должна обеспечить значительное увеличение пропускной способности и передачи данных в мобильных системах и беспроводных локальных сетях.

Данная книга организована следующим образом: в главе 2 дается обзор систем беспроводной связи, что необходимо для последующего анализа смарт-антенных систем. Затем следует глава, посвященная антенным решеткам и методам разнесенного приема с описанием свойств антенн и их классификации по характеристиками излучения. В главе 4 анализируются функциональные принципы смарт-антенн, рассматриваются их различные конфигурации и выделяются их преимущества и недостатки, связанные с коммерческим внедрением. В главе 5 рассматриваются различные методы определения направления приема сигнала. Чем точнее эта оценка, тем выше производительность адаптивной антенной системы. Глава 6 посвящена методам формирования луча, с помощью которых достигаются желаемые ДН адаптивных антенн. В следующей главе представлены результаты программы изучения, посвященной интеграции антенной конструкции, адаптивных алгоритмов и пропускной способности сети. Глава 8 посвящена способам пространственно-временной обработки сигнала. На основании анализа фундаментальных принципов и полученных экспериментальных данных демонстрируется громадное увеличение скорости передачи данных и пропускной способности, обеспечиваемое MIMO-системами. В заключение в главе 9 дается краткий обзор существующих коммерческих решений на основе адаптивных антенных систем.

Данная книга представляет собой всеобъемлющую работу по смарт-антенным системам, в которой содержится информация, собранная из различных источников. Авторы попытались дать в соответствующих главах данной книги ссылки на источники, из которых был почерпнут основной материал, послуживший отправной точкой их работы. В частности авторы подтверждают, что большая полезная информация была извлечена из многих источников и особенно из работ [17, 19–29]. Нам также удалось связаться почти со всеми основными авторами указанных по ссылкам работ, заручившись их самой благожелательной реакцией. В сущности, некоторые из них быстро предоставили иллюстрации и данные, приведенные в этой книге. Официальная принадлежность источников информации приведена в соответствующих позициях (рис. и т. п.).

# ГЛАВА 2

## ОБЗОР МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

В данной главе дается краткий обзор мобильной связи, принципов ее действия и терминология, используемая в данной книге.

### 2.1. Общее описание

Все системы связи направлены на решение одной фундаментальной задачи: передачу максимально возможного объема информации с минимальным количеством ошибок [19]. Современные системы цифровой беспроводной связи — не исключение. Как показано на рис. 2.1, эти системы обычно подразделяются на несколько элементов. Блок формирования исходных данных (кодер источника) обеспечивает устранение избыточности входных цифровых данных и, таким образом, увеличение объема полезной информации, передаваемой системой связи [19].

Данные от генератора исходного сигнала обрабатываются канальным кодером, который обеспечивает коррекцию ошибок для минимизации вероятности их появления при передаче. Далее для обеспечения одновременной связи со многими пользовательскими терминалами данные с канального кодера обрабатываются цифровым сигнальным процессором DSP (Digital Signal Processing — цифровой сигнальный процессор). В качестве примера можно привести цифровое формирование диаграммы направленности (ДН), которое за счет использования геометрических свойств антенной решетки способно обеспечить уплотнение сигналов, поступающих от нескольких пользовательских терминалов. Затем, в связи с ограничениями системы связи по полосе частот, поток данных обрабатывается модулятором, обеспечивающим преобразование низкочастотного сигнала на входе в свою высокочастотную копию на выходе [19]. Сгенерированная на выходе модулятора последовательность данных подается на антенную решетку для последующей передачи посредством беспроводного канала связи.

На другом конце радиоканала процедура носит обратный характер. Сигнал, поступающий на приемную антенну от разных пользовательских терми-

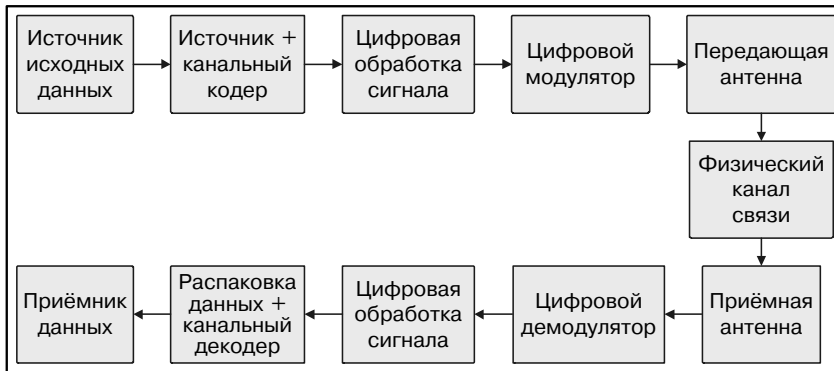


Рис. 2.1. Элементы системы связи [19]

налов, преобразовывается демодулятором с понижением частоты до своего низкочастотного эквивалента. Затем DSP осуществляет разделение сигналов, поступающих от разных пользовательских терминалов. Канальный декодер обеспечивает обнаружение и, по возможности, коррекцию ошибок, обусловленных прохождением сигнала по физическому каналу связи. Вслед за этим декодер источника распаковывает фактическую последовательность данных. Вся процедура направлена на восстановление информации с минимально возможным количеством ошибок, отправляемой с другого конца физического канала связи.

## 2.2. Обзор сотовой связи

Эра беспроводной связи началась приблизительно в 1895 году с демонстрации Гульельмо Маркони (англ. Guglielmo Marconi) возможности использования радиоволн для осуществления дальней связи<sup>1</sup>. В настоящее время сотовая связь представляет собой одно из самых востребованных и динамично развивающихся телекоммуникационных направлений. Сегодня в процентном отношении она занимает доминирующее положение в мире по количеству привлекаемых абонентов. В начале этого десятилетия количество абонентов мобильной связи превысило аналогичный показатель для стационарной связи [30]. Во многих частях мира уровень проникновения сотовой связи уже превысил 100%-й рубеж при все продолжающемся росте рынка. В настоящее время, согласно

<sup>1</sup> Для российского читателя хочется отметить, что профессор А. С. Попов 7-го мая 1895 г. продемонстрировал прием радиоволн на заседании Физико-химического общества в С.-Петербурге. Этот день признан мировой общественностью как день, когда был сделан существенный вклад в развитие беспроводной телеграфии. А в заявке на американский патент Г. Маркони писал: «Я знаком... со статьями профессора Попова, опубликованными в журнале Русского физико-химического общества в 1895 и 1896 гг.».

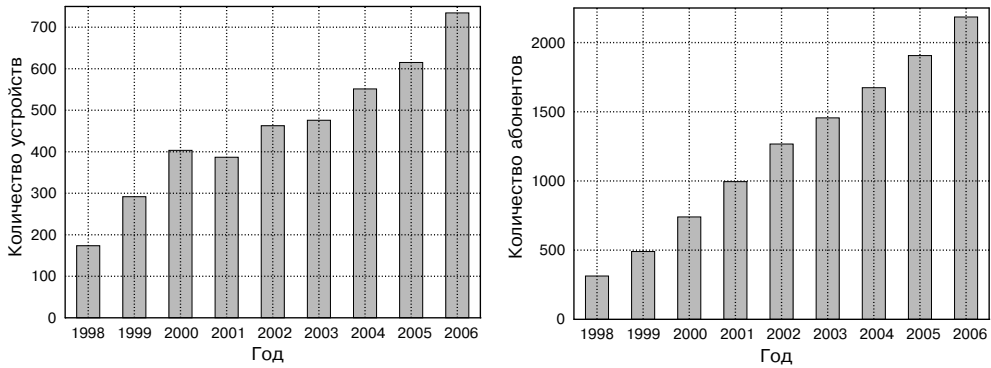


Рис. 2.2. Годовой уровень продаж сотовых телефонов (а) и подключений (б)

самым последним данным глобальной базы данных рынка сотовой связи WI (Wireless Intelligence) [31], предоставляемым совместным предприятием, состоящим из ассоциации GSM-операторов и компании Ovum, деятельность которых направлена на анализ рынка и глобальной индустрии беспроводной связи, количество новых подключений в месяц составляет 40 миллионов, что свидетельствует о самом быстром увеличении объема рынка за всю историю наблюдений. В целом ожидается, что рынок вырастет с 41 % в конце 2006 до 47 % к концу 2007, то есть речь идет о достижении сотовой связью рубежной отметки в 3 миллиарда подключений. Однако, согласно WI, количество подключений не равно количеству пользователей сотовой связи, так как на одного пользователя может приходиться более одного номера, причем в эти цифры могут входить уже не используемые номера. В общем, в то время как насыщенный Западноевропейский рынок сотовой связи находится в стадии стагнации [32], рост числа абонентов имеет ярко выраженный характер, особенно в странах Азии и некоторых странах Северной и Южной Америки. Компания Micrologic Research [33] оценила годовые уровни продаж сотовых телефонов (а) и подключений (б) в период с 1998 по 2006 гг., которые представлены соответствующими графиками на рис. 2.2.

### 2.3. Эволюция систем мобильной телефонной связи

Суть сотовой связи состоит в использовании маломощных передатчиков с возможностью многократного использования частот в заданной географической области (зоне охвата). Однако впервые предоставление услуг коммерческой сотовой связи было реализовано в 5 скандинавских странах с внедрением в 1981 году единого стандарта сотовой связи NMT (Nordic Mobile Telephone).

Использование систем сотовой связи как таковых началось в США с появлением в 1981 году перспективной службы радиотелефонной связи с подвижны-

ми объектами (AMPS). Стандарт AMPS был принят в странах Азии, Латинской Америки и Океании, что привело к формированию потенциально самого большого рынка сотовой связи в мире [35].

В начале 1980-х системы мобильной телефонной связи были аналоговыми, а не более новыми цифровыми, как в настоящее время. Неспособность аналоговых систем экономически эффективно справляться с растущим спросом на пропускную способность оказалась главным тормозом их развития. Это способствовало переходу на цифровую технологию. Превосходство цифровых систем над аналоговыми [системами] заключается в простоте передачи сигнала, более низком уровне помех, объединении функций передачи и коммутации и возможностях удовлетворения требованиям к пропускной способности [35].

Появившись в 1991 году, глобальная система связи с подвижными объектами (GSM) стала одним из ведущих стандартов цифровой сотовой связи. В настоящее время это де-факто признанный стандарт в Европе, также широко используемый и в других частях мира.

Стандарт системы коллективного доступа с кодовым разделением каналов (CDMA) появился в 1993 г. Изначально CDMA-стандарт относился к протоколу обмена данными ITU IS-95, то есть ко второму поколению технологии беспроводной мобильной связи (2G), вставшей на коммерческие рельсы в 1995 г. Она стала одной из самых быстро развивающихся технологий беспроводной связи в мире.

В 1999 г. «Международный союз электросвязи» выбрал CDMA в качестве промышленного стандарта для новых систем беспроводной связи третьего поколения (3G). Необходимость увеличения пропускной способности для передачи голосовых данных вкуче с возможностями ускоренной передачи данных [36] побудила многих ведущих операторов беспроводной связи заняться созданием или модернизацией своих сетей до стандарта 3G CDMA. Для предоставления востребованных пользователями услуг в новой версии CDMA, известной как CDMA2000 или IS-2000, обеспечена реализация как радиоинтерфейса, так и основной базовой сети [37]. Главное достоинство системы CDMA2000 состоит в поддержке всех современных требований, предъявляемых к 3G по работе с мультимедийными данными и прочими услугами, предоставляемыми по IP-адресу. CDMA2000 — идеальное решение для операторов беспроводной связи, желающих воспользоваться преимуществом динамики нового рынка мобильных устройств и Интернета [37].

Универсальная система мобильной связи UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) является преемником GSM-системы. Стандарт радиоинтерфейса многостанционного доступа с временным разделением каналов TDMA сменился стандартом широкополосного многостанционного доступа с кодовым разделением каналов W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Ac-

Таблица 2.1. Развитие систем мобильной телефонной связи [35]

Год	Система мобильной связи	
1981	NMT450	Единый стандарт сотовой связи для 5 североевропейских стран
1983	AMPS	Усовершенствованная служба мобильной телефонной связи США
1985	TACS	Система связи коллективного доступа
1986	NMT900	Единый стандарт сотовой связи для 5 североевропейских стран
1991	ADC	Американская цифровая сотовая связь
1991	GSM	Глобальная система мобильной связи
1992	DCS1800	Стандарт цифровой узкополосной связи для диапазона 1800
1993	CDMA One	
1994	PDC	Персональная система цифровой сотовой связи ( <i>Япония</i> )
1995	PCS1900	Персональная служба связи ( <i>Канада</i> )
1996	PCS	Персональная служба связи ( <i>США</i> )
2000	CDMA2000	Коллективный доступ с кодовым разделением каналов
2005	UMTS	Универсальная система мобильной связи стандарт для сотовой связи третьего поколения

cess). Такой переход был продиктован необходимостью достижения скорости передачи данных в 2 Мбит/с [38]. Кроме передачи голоса и данных, система UMTS будет обеспечивать передачу видео- и аудиоданных на беспроводные устройства по всему миру посредством стационарных, беспроводных и спутниковых систем. Система UMTS будет обслуживать большинство стран Европы. В табл. 2.1 показана мировая история развития телефонных систем мобильной связи

## 2.4. Структура

В системах беспроводной связи обычно реализуется одновременная двухсторонняя связь между двумя точками [1]: базовой станцией (БС) и подвижной станцией (ПС)/пользовательским терминалом (ПТ). Связь в направлении от базовой станции (БС) к пользовательскому терминалу (ПТ) обычно называется нисходящей линией связи или прямым каналом. Соответственно связь в направлении от ПТ к БС обычно называется восходящей линией связи или обратным каналом. В прямом канале могут участвовать две системы: передающая антенная система БС и приемная антенна ПТ. Соответственно, могут быть две системы и в обратном канале связи: передача данных от ПТ и прием на БС [1]. Пример такой системы приведен на рис. 2.3.

Сотовая телефонная система обеспечивает беспроводное соединение любого пользовательского терминала, находящегося в зоне ее покрытия, с *коммути-*



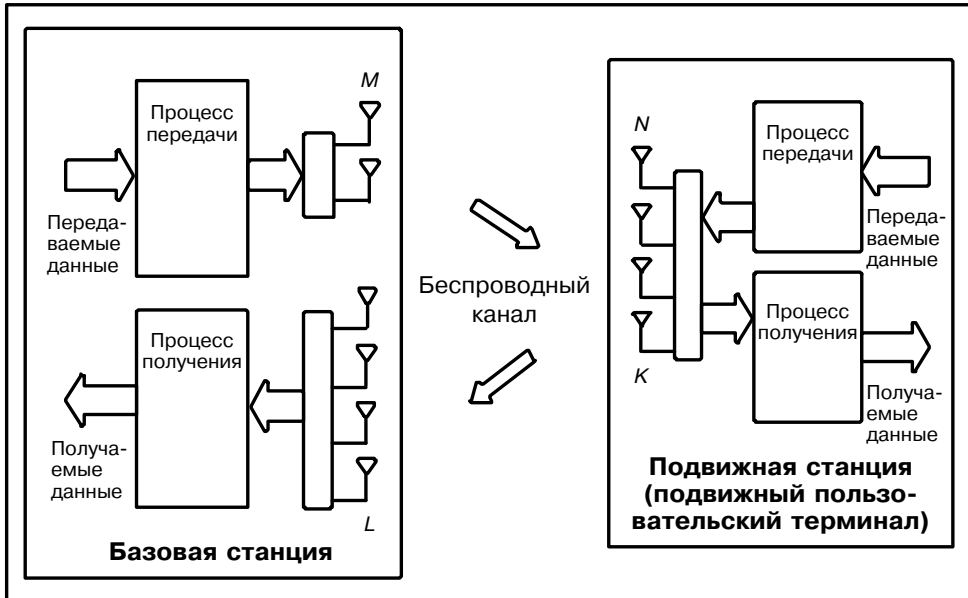


Рис. 2.3. Общая схема широкополосной радиосети беспроводной связи [1]

руемой телефонной сетью общего пользования (PSTN — Public Switched Telephone Network) [39]. Она [сотовая телефонная система] включает:

- Подвижные станции,
- Базовые станции,
- Центр коммутации подвижной связи MSC (Mobile Switching Center).

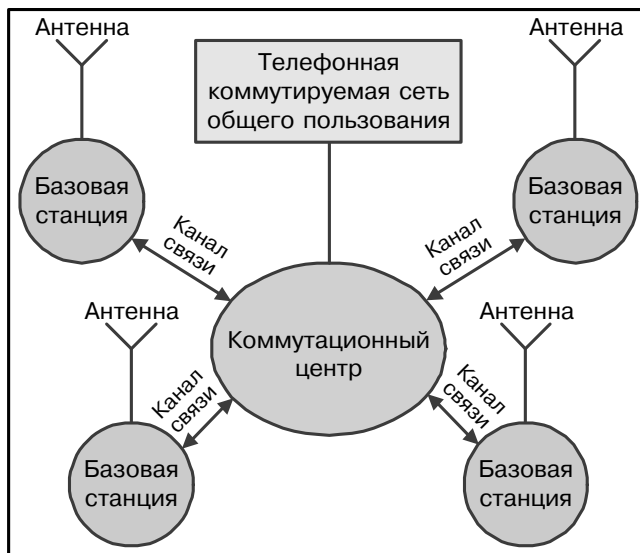


Рис. 2.4. Типичная схема базовой подвижной системы [40]

Базовая станция является мостом между подвижными пользовательскими терминалами и центром коммутации подвижной связи посредством обычных телефонных и радиорелейных линий [39]. Центр коммутации подвижной связи PSTN обеспечивает подключение всей сотовой системы к телефонной сети общего назначения. На рис. 2.4 представлена упрощенная схема работы сотовой телефонной системы связи.

## 2.5. Радиосистемы сотовой связи: концепции и эволюция

В связи с увеличением количества служб и абонентов вопрос поддержания необходимой пропускной способности всегда стоит остро. Для выхода на уровень пропускной необходимости с учетом растущего числа абонентов сотовым радиосистемам потребовались годы. Обоснование необходимости использования адаптивных антенн в структуре сотовой системы дается в историческом контексте эволюции сотовых радиосистем. С более подробными деталями можно ознакомиться в работах [13, 40, 41].

### 2.5.1. Всенаправленные системы и многократное использование канала

С самого начала разработчики были осведомлены, что проблема в пропускной способности, особенно в контексте ограничения Федеральной комиссией по связи (FCC)<sup>1</sup> количества каналов или частот. Следовательно, для предоставления услуги огромному количеству абонентов и достижения требуемой пропускной способности была необходима разработка сотовой структуры. Суть концепции заключается в том, чтобы увеличение пропускной способности могло происходить только за счет одновременного прохождения в каждом канале связи нескольких сеансов связи [40]. Один из способов реализации данной концепции состоит в многократном использовании одного и того же канала связи. Во избежание взаимных помех мобильные телефоны, использующие один и тот же радиоканал, должны находиться на достаточном расстоянии друг от друга. Сотовая структуризация представляет собой разбиение обширного географического пространства на зоны обслуживания меньшего размера, называемые сотами, на каждую из которых выделяется часть доступной полосы пропускания (многократное использование частоты), что, соответственно, делает возможным беспроводное подключение большего количества пользовательских терминалов несмотря на ограниченный спектр частот [42]. Соты, как правило, характеризуются разными размерами и сложными формами. Их форма обуслов-

<sup>1</sup> FCC — Федеральной комиссией по связи США.