

В. Ю. Бабков, И. А. Цикин

Сотовые системы мобильной радиосвязи

2-е издание



bhv®

УДК 621.39(075.8)
ББК 32.973(я73)
Б12

Бабков, В. Ю.

Б12 Сотовые системы мобильной радиосвязи: учеб. пособие / В. Ю. Бабков, И. А. Цикин. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб.: БХВ-Петербург, 2013. — 432 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)

ISBN 978-5-9775-0877-3

В систематизированном виде изложены основы построения существующих и перспективных наземных систем мобильной радиосвязи, принципы построения и функционирования наиболее распространенных на практике систем транкинговой радиосвязи, территориальных сотовых систем радиосвязи общего пользования с частотно-временным, кодовым и ортогонально-частотным разделением каналов, систем широкополосного беспроводного доступа к Интернету, а также вопросы частотно-территориального планирования сотовых систем мобильной радиосвязи с использованием геоинформационных баз данных и систем автоматизированного проектирования. Во втором издании переработана и дополнена часть, связанная с применением различных методов модуляции и кодирования, дополнительно рассмотрены особенности планирования сетей передачи WCDMA и LTE, маршрутизации в самоорганизующихся пакетных сетях, расширено изложение принципов позиционирования абонентских станций.

*Для студентов технических вузов, инженеров и специалистов,
работающих в области инфокоммуникационных технологий и систем связи*

УДК 621.39(075.8)
ББК 32.973(я73)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

М. А. Сиверс, д-р техн. наук, проф., завкафедрой радиопередающих устройств и подвижной связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Ю. С. Шинаков, д-р техн. наук, проф. Московского технического университета связи и информатики

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Людмила Еремеевская</i>
Зав. редакцией	<i>Екатерина Капальгина</i>
Редактор	<i>Анна Кузьмина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн серии	<i>Инны Тачиной</i>
Оформление обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>
Фото	<i>Кирилла Сергеева</i>

Подписано в печать 31.05.13.

Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 34,83.

Тираж 1000 экз. Заказ №

"БХВ-Петербург", 191036, Санкт-Петербург, Гончарная ул., 20.

Первая Академическая типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12/28

ISBN 978-5-9775-0877-3

© Бабков В. Ю., Цикин И. А., 2013
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2013

Оглавление

Введение	7
Глава 1. Принципы построения сотовых систем мобильной радиосвязи	11
1.1. Общие требования к сотовым сетям мобильной радиосвязи.....	11
1.2. Классификация услуг в сетях мобильной радиосвязи	13
1.3. Эталонная модель, стандарты и протоколы	15
1.4. Архитектура сотовых систем.....	18
Глава 2. Многостанционный доступ в системах мобильной радиосвязи	23
2.1. Принципы многостанционного доступа в системах мобильной радиосвязи	23
2.2. Протоколы многостанционного доступа	26
Глава 3. Принципы обслуживания вызовов в системах мобильной радиосвязи	29
3.1. Организация процесса обслуживания.....	29
3.2. Системы с отказами в обслуживании	30
3.3. Системы с ожиданием обслуживания.....	31
Глава 4. Характеристики радиоканала в сотовых системах мобильной радиосвязи	37
4.1. Модель многолучевого распространения сигналов.....	37
4.2. Затухание радиосигналов в процессе распространения	39
4.3. Замирания радиосигналов.....	43
4.4. Аддитивные помехи	44
4.5. Интервалы частотной и временной когерентности радиоканала [17, 22, 41].....	46
Глава 5. Компенсация искажений сигналов при распространении радиоволн	49
5.1. Методы борьбы с замираниями и искажениями сигналов	49
5.2. Устранение влияния межсимвольной интерференции в отсчетных точках [14, 31]	50
5.3. Эквалайзеры [14, 31]	57
Глава 6. Методы модуляции в цифровых системах мобильной радиосвязи	65
6.1. Двоичные ансамбли сигналов.....	65
6.2. Модуляция с минимальным сдвигом частоты	71

6.3. Гауссова модуляция с минимальным сдвигом частоты [22, 41].....	77
6.4. Многопозиционные системы передачи [34, 42].....	81
6.5. Ансамбли ортогональных сигналов [29, 42]	86
6.6. Квадратурная фазовая модуляция	87
6.7. Многократная фазовая модуляция	91
6.8. Амплитудно-фазовая модуляция [22, 41]	95
6.9. Многочастотная модуляция [14, 17]	97

Глава 7. Принципы передачи речевой информации в цифровых системах

мобильной радиосвязи	101
7.1. Общие положения.....	101
7.2. Прямое аналого-цифровое преобразование. Импульсно-кодовая модуляция (рекомендация G.711)	103
7.3. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция	104
7.4. Адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (рекомендации G.721, G.726)	106
7.5. Адаптивная дельта-модуляция	109
7.6. Кодирование с линейным предсказанием (рекомендации G.728, G.729, G.723)	110

Глава 8. Помехоустойчивое кодирование в системах

мобильной радиосвязи	113
8.1. Составные сигналы.....	113
8.2. Принципы помехоустойчивого кодирования.....	114
8.3. Методы построения и декодирования блоковых кодов	121
8.4. Сверточные коды.....	126
8.5. Перемежение кодовых символов	134
8.6. Турбокоды.....	136
8.7. Составные коды	138
8.8. Сигнально-кодовые конструкции [14]	141

Глава 9. Принципы локализации подвижных абонентов в сетях

мобильной радиосвязи	149
9.1. Общие положения.....	149
9.2. Регистрация по таймеру	151
9.3. Регистрация на основе расстояния	151
9.4. Регистрация по смене зоны.....	152
9.5. Поиск при вызове из сети	154

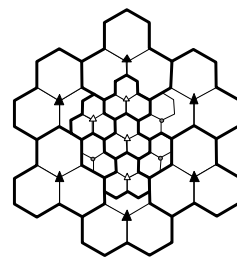
Глава 10. Принципы позиционирования абонентских станций

в сетях мобильной радиосвязи	159
10.1. Общие положения.....	159
10.2. GPS-позиционирование с сетевой поддержкой	161
10.3. Позиционирование по идентификатору соты и времени упреждения.....	163
10.4. Позиционирование по идентификатору соты и времени приема-передачи сигналов управления.....	164
10.5. Позиционирование по идентификатору соты и разности времен прихода пилотных сигналов	165
10.6. Позиционирование по разности моментов времени прихода сигналов по линии "вверх"	166
10.7. Сравнительный анализ методов позиционирования.....	167

Глава 11. Принципы обеспечения информационной безопасности в системах мобильной радиосвязи.....	169
11.1. Общие положения.....	169
11.2. Угрозы сообщению.....	170
11.3. Угрозы пользователю.....	171
11.4. Угрозы системе.....	172
11.5. Шифрование информации.....	173
11.6. Идентификация и аутентификация.....	175
Глава 12. Транкинговые системы мобильной радиосвязи.....	177
12.1. Общие положения.....	177
12.2. Транкинговые системы стандарта SmartTrunk II [3, 43].....	183
12.3. Транкинговые системы стандарта MPT 1327 [17, 43].....	186
12.4. Транкинговые системы стандарта EDACS [3, 43].....	189
12.5. Транкинговая система TETRA [17, 23].....	193
12.6. Транкинговая система стандарта APCO 25 [23].....	215
12.7. Транкинговая система Tetrapol [23].....	216
Глава 13. Территориальные сотовые системы мобильной радиосвязи общего пользования.....	219
13.1. Общие положения.....	219
13.2. Системы мобильной сотовой связи с частотно-временным разделением каналов.....	222
13.2.1. Основные характеристики стандарта GSM.....	222
13.2.2. Алгоритмы работы сети GSM [30].....	229
13.2.3. Предоставление услуг абонентам GSM.....	236
13.2.4. Технология GPRS.....	238
13.2.5. Технология EDGE.....	241
13.3. Системы сотовой связи с кодовым разделением каналов.....	243
13.3.1. Стандарт IS-95 (cdmaOne).....	243
13.3.2. Особенности стандарта CDMA 2000 [7].....	266
13.3.3. Особенности стандарта CDMA2000 1xEV-DO [24].....	271
13.3.4. Особенности стандарта W-CDMA [21].....	283
13.3.5. Особенности технологии W-CDMA/HSDPA [21].....	288
13.4. Технология и архитектура сетей LTE [20, 39, 44].....	292
Глава 14. Системы широкополосного беспроводного доступа.....	305
14.1. Развитие систем беспроводного доступа.....	305
14.2. Особенности стандарта IEEE 802.16 [18].....	312
14.3. Особенности технологии мобильного WiMax стандарта IEEE 802.16e [19].....	325
14.4. Mesh-сети.....	327
Глава 15. Частотно-территориальное планирование сотовых сетей мобильной радиосвязи.....	333
15.1. Общие положения.....	333
15.2. Принципы использования геоинформационных баз данных при решении задач планирования сетей подвижной радиосвязи.....	337
15.3. Требования к картографической информации и геоинформационным базам данных при планировании радиосвязи.....	339
15.4. Геоинформационная система для автоматизированного проектирования сетей мобильной радиосвязи.....	346

15.5. Алгоритм частотно-территориального планирования.....	348
15.6. Методика построения начального приближения сотовой сети с частотно-временным разделением каналов	354
15.7. Методика построения начального приближения сотовой сети с кодовым разделением каналов.....	364
15.8. Планирование услуг мобильного Интернета в сетях с кодовым разделением каналов.....	377
15.9. Особенности планирования сети W-CDMA-HSDPA.....	397
15.10. Особенности построения сотовой сети с ортогональным частотным разделением каналов.....	405
Список литературы.....	417
Список сокращений	421
Аббревиатуры на русском языке	421
Аббревиатуры на английском языке	423
Предметный указатель	431

ГЛАВА 1



Принципы построения сотовых систем мобильной радиосвязи

1.1. Общие требования к сотовым сетям мобильной радиосвязи

Можно выделить ряд требований общего характера, предъявляемых к современным и перспективным системам мобильной радиосвязи.

Высокоскоростная передача данных. В системах мобильной радиосвязи предыдущих поколений скорость передачи информации в радиоканале определялась требованиями, связанными с передачей только речевых сообщений, причем сетевое влияние на радиоканал ограничивалось работой систем автоматического переключения секторов и управления мощностью излучения мобильной абонентской станции (терминала). Дополнительные особенности связаны с критичностью канала передачи речи ("разговорного" канала) к задержкам, что накладывает ограничения на повторную передачу и кодирование. На современном этапе развития рассматриваемых систем появляются новые услуги, реализация которых требует наличия высокоскоростных каналов передачи данных. При этом разные приложения предъявляют различные требования к скорости передачи и временным характеристикам канала.

Помехоустойчивость. Одной из существенных особенностей радиоканала является нестабильность параметров и наличие замираний. При перемещении абонента на значительные расстояния возникают медленные замирания уровня принимаемого сигнала. На них накладываются быстрые замирания, вызванные многолучевым распространением сигнала. При увеличении скорости передачи и неизменной средней мощности излучаемого сигнала уменьшается энергия сигнала, приходящаяся на один бит передаваемой информации, что приводит к росту вероятности ошибочного приема. Для компенсации этого используют различные технические решения. Так, если трафик не критичен к задержкам (например, при просмотре Web-страниц), возможна повторная передача пораженных ошибками пакетов. Помимо этого применяют разные методы помехоустойчивого кодирования, позволяющие

повысить энергетическую эффективность системы, т. е. снизить величину энергии, затрачиваемой на передачу одного бита сообщения. Все эти меры направлены на сохранение работоспособности мобильного терминала в условиях нестабильного радиоканала.

Высокая спектральная эффективность. Каждому оператору системы выделяется определенная полоса частот, за которые берется достаточно высокая плата. В таких условиях ограниченного частотного ресурса необходимо обеспечить высокую спектральную эффективность, обычно измеряемую удельной скоростью передачи информации в единицах (бит/с)/Гц.

Асимметричность трафика. Поскольку в Интернете существует асимметричность потоков данных (поток данных нисходящей линии значительно больше потока данных восходящей линии), то для эффективного использования ресурсов системы должно быть предусмотрено неравенство потоков "вверх" и "вниз". Трафик линии "вверх", как правило, представляет собой запросы абонентов на загрузку страниц или файлов, когда передаются адреса серверов и различная служебная информация. В то же время по линии "вниз" происходит передача затребованных файлов. При одинаковой пропускной способности каналов в обоих направлениях использование ресурсов сети было бы нерациональным.

Высокая пропускная способность. Требуемая пропускная способность определяется суммарной скоростью передачи данных для всех пользователей. Существуют различные алгоритмы распределения ресурсов между пользователями, применение которых позволяет увеличить пропускную способность сети.

Безопасность. Должны быть предусмотрены меры для защиты пользовательской информации и сети от несанкционированного доступа. Безопасность в радиосетях основана на процедурах аутентификации, проверки целостности и шифрования. В процессе аутентификации сеть проверяет подлинность устройства. Проверка целостности гарантирует, что информация не была изменена при передаче. Шифрование гарантирует секретность передачи данных. При оценке уровня безопасности рассматриваются два главных компонента: качество алгоритма шифрования и длина используемого ключа шифрования. Существует множество различных алгоритмов шифрования. В системах третьего поколения для достижения высокой безопасности используются современные алгоритмы шифрования совместно с новейшими методами защиты в Интернете. Совмещение этих методов делает систему более безопасной.

Требования к сетевой архитектуре. В современных и перспективных системах мобильной радиосвязи должны присутствовать узлы, отвечающие за управление пакетной передачей данных и связью с Интернетом. Все эти устройства должны поддерживать протоколы Интернета и работу служб доступа к сетям передачи данных с коммутацией пакетов для мобильных пользователей. Соответственно должны присутствовать службы, отвечающие за назначение IP-адресов, конфигурацию устройств и, тем самым, обеспечивающие работу в Интернете. Усложняется работа биллинговых центров, т. к. появляются новые схемы оплаты. Так, например, возможна как повременная оплата, так и оплата за объем принятого трафика.

Все перечисленные требования взаимосвязаны, поэтому результирующие решения всегда являются компромиссными.

1.2. Классификация услуг в сетях мобильной радиосвязи

Современные и перспективные системы мобильной радиосвязи должны иметь возможность обеспечить весь спектр современных услуг: передачу речи, работу в режиме коммутации каналов и коммутации пакетов, взаимодействие с интернет-приложениями, симметричную и асимметричную передачу информации с высоким качеством связи и в то же время гарантировать совместимость с существующими системами.

Приложения и услуги могут быть разделены на разные группы. В документах и проектах организаций стандартизации определены следующие классы услуг [8]:

- ◆ разговорный;
- ◆ потоковый;
- ◆ интерактивный (диалоговый);
- ◆ фоновый (низкоприоритетный).

Профиль каждого класса характеризует сочетание параметров, которое наилучшим образом приближается к требованиям конкретных приложений. Определение принадлежности услуги к определенному классу и присвоение ей соответствующего профиля является основой обеспечения заданного качества обслуживания. Главное отличие приложений данных классов — чувствительность трафика к временным задержкам. Поточковый класс предоставляет услуги, требующие передачи в реальном времени, с малой задержкой, а фоновый класс — для предоставления пользовательских приложений, не критичных к реальному масштабу времени. Основные особенности этих классов услуг приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Класс трафика	Основные характеристики	Примеры приложений
Разговорный	Передача в реальном масштабе времени; низкая временная задержка; симметричность трафика	Телефония, видеотелефония, видеоконференц-связь
Потоковый	Сохранение временной зависимости между информационными составляющими потока	Мультимедиа
Интерактивный	Ответ на запрос	Интернет
Фоновый	Передача в произвольный момент времени	Электронная почта, SMS, MMS

Разговорный класс. Основным приложением этого класса является передача речи. Сюда входят и новые услуги сотовой связи, передача которых критична к реальному масштабу времени, — IP-телефония и видеоконференц-связь. Разговор в режиме реального времени осуществляется всегда между равнозначными конечными пользователями и характеризуется низкой задержкой и симметричным тра-

фиком. Трафик реального времени допускает относительно небольшие длительности задержки и малочувствителен к потерям. Максимальная задержка видео и речи должна быть не более 150—200 мс, и нарушение этого требования приводит к неприемлемому качеству услуги.

Потоковый класс. Потоковый трафик порождается приложениями, связанными с передачей аудио- и видеoinформации. Эти приложения генерируют потоки пакетов, имеющие определенную скорость передачи, которая должна быть сохранена во время сеанса связи. При этом допустимы более длительные, по сравнению с трафиком реального времени, задержки. Этот тип трафика относительно малочувствителен к потерям. Таким образом, потоковые мультимедийные приложения требуют передачи равномерного и непрерывного потока данных. Данная технология важна при загрузке больших мультимедийных файлов. При потоковой передаче данных пользователь может начать отображение данных еще до того, как файл будет принят целиком.

Интернет-видеопродукты и сопутствующую медиаиндустрию можно разделить на сетевое вещание и потоковое видео по запросу.

Сетевое вещание обычно производится на большую аудиторию пользователей, которые соединяются с Интернетом через сервер сети мобильной связи.

Потоковое видео по запросу в большинстве случаев предоставляется большими корпорациями, хранящими видеоклипы на серверах, доступ к которым одновременно могут получить более сотни пользователей локальной сети.

Интерактивный класс. Интерактивный (диалоговый) трафик характеризуется передачей данных пользователю в ответ на его запрос.

Фоновый класс. К фоновому (низкоприоритетному) классу относятся передача электронной почты, служба коротких сообщений *SMS* (Short Message Service), служба мультимедийных сообщений *MMS* (Multimedia Message Service), загрузка баз данных и получение данных, т. е. приложения, которые не требуют мгновенной активации и задержка которых может составлять секунды и даже минуты.

Примером таких услуг являются также услуги, связанные с определением местоположения мобильного абонента — одно из новых направлений в сетях мобильной связи. Эти услуги обеспечивает оператор, который будет использовать доступную информацию о местонахождении абонентского терминала. Знание местоположения пользователя позволит предлагать:

- ◆ "навигационные" услуги (предварительный заказ билетов и прием различных заказов с привязкой к текущему местоположению пользователя);
- ◆ справочную информацию, привязанную к текущему местоположению пользователя;
- ◆ соединение пользователя со службами обеспечения безопасности и службами экстренной помощи;
- ◆ биллинговые услуги, учитывающие местоположение источника и адресата информации и др.

В последнее время быстро растет интерес к Web-вещанию через Интернет. Характеристики и цены наравне с мобильностью, обеспечивающей доступ к услугам из любого места, являются ключевыми факторами в конкурентной борьбе в секто-

рах видео- и аудиоразвлечений. Мобильность может открыть новые возможности разработчикам игр и поставщикам игровых услуг, предоставляя пользователям широкий выбор игр с любыми партнерами по всему миру.

Через системы мобильной радиосвязи можно экономически эффективно предоставлять услуги в области дистанционного обучения в тех регионах, где прокладка фиксированных линий связи обойдется слишком дорого, например в сельских районах с малой плотностью населения. Важным преимуществом здесь может оказаться способность систем обеспечить большую пропускную способность сети и поддержку интерактивности в сочетании с малыми затратами на создание инфраструктуры.

Необходимо отметить также важную роль мобильной радиосвязи в реализации технологий групповой работы в сети, интенсивно развивающихся в условиях глобализованной экономики.

1.3. Эталонная модель, стандарты и протоколы

При создании систем мобильной связи используется *эталонная модель взаимодействия открытых систем*, предложенная Международной организацией по стандартизации ISO (International Organization for Standardization). Эта модель, называемая обычно модель OSI (Open System Interconnection), или модель ISO/OSI, описывает функциональную среду, объединяющую процессы и физические средства соединения различных взаимодействующих друг с другом открытых систем. При этом под открытыми понимаются системы, удовлетворяющие требованиям общепринятых международных стандартов. Уровни этой эталонной модели приведены в табл. 1.2 [4].

Таблица 1.2

Номер уровня	Уровень	Функции уровня
7	Прикладной (Application)	Обеспечение доступа прикладных процессов (электронная почта, факс, пакетная передача речи, транзакции денежных средств и т. п.)
6	Представительный (Presentation)	Управление синтаксисом блоков данных, которыми обмениваются абоненты (форматы данных, коды и т. п.)
5	Сеансовый (Session)	Установление сеансового соединения и поддержание взаимодействия прикладных процессов
4	Транспортный (Transport)	Передача данных между абонентами сети с заданным качеством обслуживания; оптимизация используемых сетевых ресурсов

Таблица 1.2 (окончание)

Номер уровня	Уровень	Функции уровня
3	Сетевой (Network)	Установление адресов маршрутов для передачи пакетов данных по сети; управление ресурсами сети, вызовами, мобильностью
2	Канальный (Data Link)	Формирование блоков данных (кадров), доступ к среде (Media Access Control) и управление радиоканалами (Radio Link Control)
1	Физический (Physical)	Передача информации по физическим каналам связи, включая помехоустойчивое кодирование и модуляцию

Некоторые уровни, расположенные ниже сеансового, определяют передачу информации через коммуникационные сети. При этом образуются сквозные соединения, "прокладка" которых возлагается на транспортный (четвертый) уровень. На нем обеспечиваются различные классы сервиса, позволяющие удовлетворить запросы сеансового уровня по пропускной способности, задержкам передачи, приоритетности сообщений и др.

На третьем (сетевом) уровне решаются задачи прокладки сетевых соединений, маршрутизации информации, управления потоками информации для предотвращения перегрузки сети.

Непосредственно передача информации происходит на канальном и физическом уровнях, причем на канальном уровне осуществляется установление и ликвидация канальных соединений, обнаружение и исправление ошибок, обеспечение прозрачности соединения, а на физическом уровне — сопряжение систем со средой передачи информации и определение характеристик, обеспечивающих доступ к физическим средствам соединения.

В модели OSI взаимодействие различных конечных пользователей (абонентов) при передаче информации происходит не непосредственно между одноименными уровнями, т. е. не "по горизонтали", а "по вертикали" за исключением самого нижнего (физического) уровня, на котором информация передается непосредственно от одного абонента к другому. Связь же между одноименными уровнями различных абонентов осуществляется по так называемым *логическим* каналам (рис. 1.1).

Таким образом, для осуществления взаимодействия двух абонентов на одном уровне рассматриваемой модели каждый вышестоящий уровень обращается к своему нижестоящему уровню как к поставщику услуги. Например, самый верхний (прикладной) уровень, взаимодействующий с реальным пользователем, должен предоставить пользователю возможность обращения к техническим средствам передачи и обработки информации через уровень представления. Иначе говоря, на прикладном уровне описывается семантика передаваемой информации. Эта информация снабжается необходимым заголовком и в виде блока прикладного уровня передается для дальнейшей обработки на уровень представления.

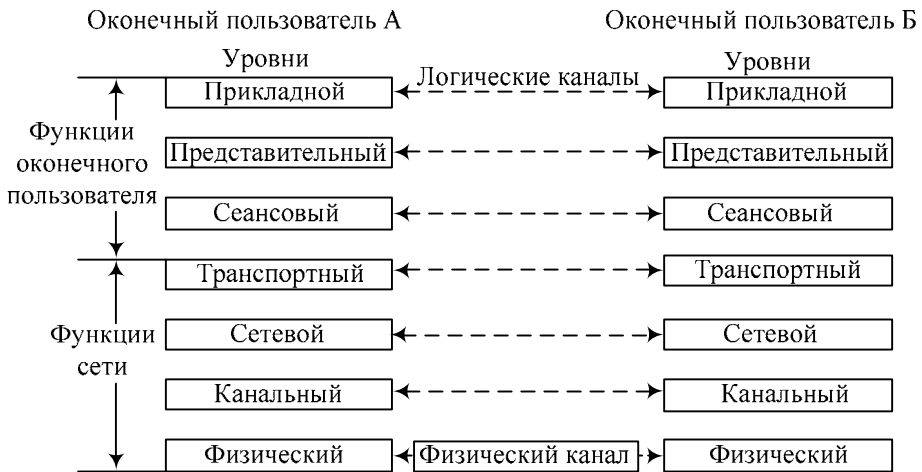


Рис. 1.1. Эталонная модель взаимодействия открытых систем

На этом уровне описывается "синтаксис" передаваемой информации и правила интерпретации данных приемной стороной с учетом используемой системы сжатия или шифрования.

Снабженный новым заголовком блок данных уровня представления передается на сеансовый уровень. Последний служит для управления процедурами диалога, включающими установление связи, обнаружение и установление направления передачи и отслеживания контрольных точек передачи во времени.

Снабженный еще одним заголовком блок данных сеансового уровня передается на транспортный уровень, который задает нормативы передачи сообщений от одного пользователя к другому, включая требования к контролю за ошибками, автоматическому восстановлению прерываний связи, автоматическому контролю за правильностью передаваемых данных и др. Перечисленные сведения отражаются в очередном заголовке, и в таком виде блок данных транспортного уровня направляется далее для передачи в сеть.

Каждый из уровней передающей стороны взаимодействует с таким же уровнем принимающей стороны с помощью протоколов связи, под которыми понимается совокупность определений, соглашений, правил, регламентирующих формат и процедуры логического взаимодействия между компонентами одного уровня взаимодействующих систем.

Протоколы взаимодействия открытых систем на трех верхних уровнях модели OSI называются *протоколами высокого уровня*, а выполняемые ими функции относятся к функциям оконечного пользователя.

Функции протоколов четырех нижних уровней относятся к функциям сети. Поступающий на сетевой уровень блок данных транспортного уровня снабжается новым заголовком, который содержит сведения об адресах отправителя и получателя, порядковую нумерацию блока и другую служебную информацию. Сформированный таким образом блок данных сетевого уровня называют *пакетом*.

Для того чтобы передать пакет по сети, сетевой уровень обращается к канальному уровню, который гарантирует доставку пакета только до ближайшего узла сети. Для этого пакет снабжается еще одним заголовком (заголовком канального уровня), несущим собственную порядковую нумерацию блоков, передаваемых по данному участку, адрес узла назначения и другую служебную информацию. Блок данных, сформированный на канальном уровне, называется *кадром*.

Для передачи кадра до соседнего узла канальный уровень обращается к услуге физического уровня. Кадр, принятый соседним узлом, освобождается от заголовка уровня канала и превращается в пакет. Полученный пакет передается на сетевой уровень, где анализируется его заголовок и определяется направление дальнейшей передачи. Затем из этого пакета формируется новый кадр, который передается по следующему участку сети и доставляется на окончательный узел.

Именно с разработки протоколов и начинается реализация *стандарта*, т. е. документа, устанавливающего нормы, правила и требования к объекту стандартизации, утвержденные компетентным органом. Применение стандартов способствует повышению уровня унификации, взаимозаменяемости, росту эффективности эксплуатации и ремонта средств мобильной радиосвязи.

Применительно к системам мобильной связи должны быть определены протоколы взаимодействия на трех нижних уровнях эталонной модели.

На самом нижнем (физическом) уровне определяются характеристики среды распространения радиоволн. Это не только диапазон частот, тип модуляции и т. д., но и структура информационного обмена с наименьшей потерей достоверности при конкретном протоколе управления множественным доступом к ресурсам радиоканалов системы мобильной радиосвязи.

Второй (канальный) уровень — это уровень канала передачи данных. Он состоит из интеллектуальных средств, предназначенных для надежной передачи информационных сообщений и сигналов управления по радиоканалу. Здесь должна быть определена структура передачи сообщений высшего уровня с учетом соответствия физических ограничений нижнего уровня и возможности подтверждения со стороны приемной части.

На третьем (сетевом) уровне осуществляется управление всеми вызовами и другими функциями радиосети. Он подразделяется на подуровни управления: вызовами, подвижными средствами и ресурсами радиоканалов. Здесь должны быть определены соответствующие протоколы управления. Применительно к рассмотренным выше уровням эталонной модели для вновь разрабатываемых систем мобильной связи должны быть подготовлены *спецификации* (основные документы, в которых указываются название изделия, составные части и элементы и другие данные, перечислены подробности, на которые необходимо обратить внимание) протоколов и услуг.

1.4. Архитектура сотовых систем

В основе построения сотовых систем мобильной связи лежит принцип разделения обслуживаемой территории на зоны, или *соты*. Архитектура сети сотовой связи приведена на рис. 1.2 [17].

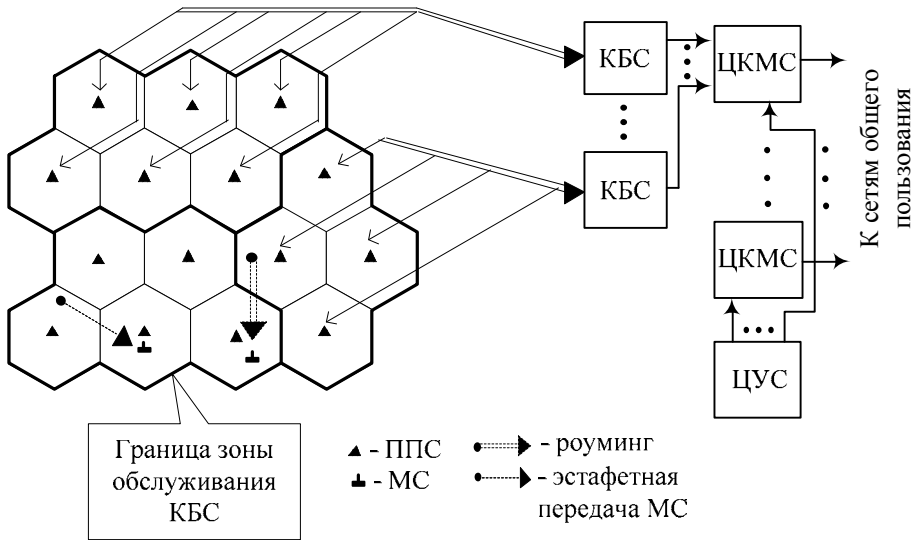


Рис. 1.2. Архитектура сети сотовой связи

В каждой соте устанавливается *приемопередающая станция* (ППС — Base Transceiver Station, BTS), управляемая контроллером. Приемопередающая станция и контроллер образуют функциональную единицу — *базовую станцию* (БС — Base Station, BS), осуществляющую связь с *мобильными станциями* (МС — Mobile Station, MS). Как правило, один *контроллер базовой станции* (КБС — Base Station Controller, BSC) управляет несколькими приемопередатчиками базовых станций.

Подсистема базовых станций (ПБС — Base Station Subsystem, BSS), или, иначе, сеть базовых станций, включает базовые ППС и КБС. Таким образом, радиопокрытие ПБС делится на соты, каждая из которых покрывается одной БС. При этом ППС управляет протоколами радиосвязи с мобильными абонентскими станциями, в то время как КБС управляет ресурсами одной или нескольких ППС, обеспечивая предоставление радиоканалов и частот, управление *эстафетной передачей* (handover), т. е. переключением каналов связи при переходе МС в активном состоянии из зоны действия одной БС в зону действия другой. КБС также осуществляет взаимодействие между МС и *центром коммутации мобильной связи* (ЦКМС — Mobile Switching Centre, MSC), который является основным элементом *сетевой подсистемы* (Network Subsystem, NSS), или, иначе, *транспортной сети* (ТС).

В общем случае сотовая топология включает абонентские сети (если предусмотрена возможность работы абонентских станций напрямую без использования базовых станций, например, ведомственные сотовые системы мобильной связи), ПБС и ТС.

Сотовая топология имеет ряд важных достоинств. Во-первых, более эффективно используется частотно-временной ресурс: одни и те же радиоканалы можно использовать в разных сотах, находящихся друг от друга на некотором расстоянии.

Во-вторых, можно применять передатчики меньшей мощности как на базовых (БС), так и на мобильных (МС) станциях. Работа в таком режиме позволяет эко-

номно расходовать источники питания МС и уменьшать массогабаритные параметры абонентских терминалов.

В-третьих, сотовая топология позволяет эффективно формировать зону обслуживания сети в соответствии с особенностями местности, распределением уровня электромагнитного поля и плотностью размещения мобильных абонентов.

Однако сотовая топология сети требует контроля за перемещением абонентов, работающих в режиме ожидания (дежурном приеме) и в активном режиме (прием — передача сообщений). Эти задачи и ряд других возлагаются на ЦКМС, который обеспечивает:

- ◆ хранение системной информации о МС;
- ◆ регистрацию и идентификацию МС;
- ◆ обновление информации о местонахождении МС;
- ◆ эстафетную передачу;
- ◆ подключение каналов стационарных (фиксированных) сетей общего пользования к конкретной БС;
- ◆ связь МС внутри радиосети без обращения к сетям общего пользования.

Контроль за перемещением абонентов в режиме ожидания необходим, если номер мобильного абонента передается по каналу вызова не всеми БС сети, а только группой БС, покрывающей зону поиска абонента в данный момент времени.

Контроль за перемещением абонентов в активном состоянии необходим для обеспечения эстафетной передачи абонентов с минимальными перерывами связи и может осуществляться по уровню сигнала в специальном контрольном канале. Если отношение "сигнал/шум" в контрольном канале станет меньше порогового, принимают решение о переключении МС на другую БС или об изменении уровня мощности передатчиков соответствующих МС и БС.

Эти услуги реализуются с помощью специальных функциональных элементов:

- ◆ *регистров справочных данных* (РСД — Home Location Register, HLR), в которых хранятся справочные данные постоянно зарегистрированных в сети абонентов;
- ◆ *визитных регистров положения* (ВРП — Visitors Location Register, VLR) — сетевой базы данных, в которой хранятся сведения о перемещениях абонентов.

Указанные функциональные элементы входят в ТС и работают совместно с ЦКМС. Доступ к этим функциональным элементам возможен по сети общеканальной сигнализации SS7 (Signalling System № 7).

Существуют четыре типа хэндоверов, используемых соответственно в зависимости от следующих ситуаций:

- ◆ каналы связи находятся в одной и той же ячейке (cote или секторе);
- ◆ соты находятся под управлением одного и того же контроллера КБС;
- ◆ соты находятся под управлением различных контроллеров КБС, которые управляются одним ЦКМС;
- ◆ соты находятся под управлением различных КБС, которые в свою очередь управляются различными ЦКМС.

Первые два типа хэндовера ("внутренние") используют только один КБС. Они управляются этим КБС, и при этом ЦКМС лишь уведомляется о завершении процедуры хэндовера.

Третий и четвертый типы хэндовера ("внешние"), соответствующие двум оставшимся типам ситуаций, совершаются под управлением ЦКМС.

Инициатором начала процедуры хэндовера может быть сама МС при переходе из одной соты в другую, либо ЦКМС — для сохранения баланса нагрузки сети.

Когда мобильный абонент переходит из зоны обслуживания одного ЦКМС в зону обслуживания другого, происходит процедура *роуминга* (roaming). При роуминге перемещение МС регистрируется, и системная информация о данной МС передается на визируемый ЦКМС.

Данная концепция позволяет строить сотовые сети, состоящие из совокупности ЦКМС, каждый из которых управляет работой нескольких КБС.

Общее управление и контроль за работой сети осуществляется с помощью *Центра управления и обслуживания сети* (ЦУС — Operation and Maintenance Centre, OMC).

Принцип построения сотовых сетей, как уже отмечалось, позволяет снизить дефицит радиочастот за счет их повторного использования. Быстрое затухание радиоволн на многочисленных препятствиях на трассе распространения (здания, холмы, деревья и т. д.) позволяет применять одни и те же частоты в различных сотах сети, отстоящих друг от друга на определенном расстоянии.

Группу примыкающих друг к другу сот, в пределах которой повторное использование одних и тех же частот недопустимо из-за превышения порогового уровня взаимных помех, называют *частотным кластером*. В общем случае сеть сотовой связи строят, повторяя одни и те же частотные кластеры в пределах зоны обслуживания сети.

Повышение эффективности системы требует максимального повторного использования радиочастот. Для того чтобы сделать это, не уменьшая радиусы сот и мощности передатчиков БС, применяют *секторизацию* сот с помощью направленных антенн. Ширина диаграммы направленности (ДН) антенны соответствует угловому размеру сектора. Как правило, в мобильной сотовой связи используют антенны с шириной ДН 120° (трехсекторные соты), реже — с шириной ДН 60° (шестисекторные соты). Благодаря разделению сот на секторы увеличивается абонентская емкость сети.

Таким образом, частотный кластер состоит из n сот, каждая из которых может иметь m секторов. *Размер* кластера в этом случае определяется как $(n, m \times n)$, где $m \times n$ — число секторов в частотном кластере. На практике широко применяют кластеры размером $(3, 9)$, $(4, 12)$, $(7, 21)$ (рис. 1.3).

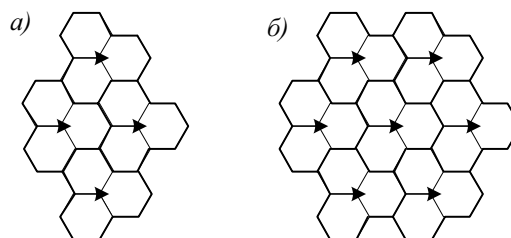


Рис. 1.3. Вид секторизованных частотных кластеров размера $(4, 12)$ (а) и $(7, 21)$ (б)

Чем выше спектральная эффективность системы, тем меньших размеров кластеры можно использовать. В аналоговых системах сотовой связи обычно используют кластеры (7, 21), в цифровых системах — (3, 9), (4, 12). Это объясняется тем, что помехоустойчивость цифровых систем выше, чем аналоговых, и они могут обеспечить заданное качество связи при большем уровне взаимных помех.

Автоматическое регулирование мощности (АРМ) передатчиков МС и БС позволяет уменьшить уровень внутрисистемных помех, увеличить пропускную способность сети и эффективно варьировать размеры сот в зависимости от плотности размещения абонентов в зоне обслуживания сети. Например, при увеличении плотности размещения абонентов от периферии к центру целесообразно увеличивать радиусы сот в направлении от центра к периферии. Это позволит уменьшить количество БС в сети за счет более эффективного их использования.

Решение об изменении мощности передатчиков принимается на основании измерений уровня сигнала в специальном контрольном канале и отношения "сигнал/шум" в канале трафика. Высокая точность и быстродействие АРМ современных систем сотовой связи позволяют также эффективно бороться с медленными и быстрыми замираниями сигналов.

Изменение размеров сот в пределах одной сети называют *расщеплением сот* (cell splitting). На рис. 1.4 показана топология сети с расщеплением сот. Как видно из рисунка, при использовании расщепления возможны два типа сот: с одинаковыми секторами ("большие" и "малые" соты) и с разными секторами ("переходные" соты).

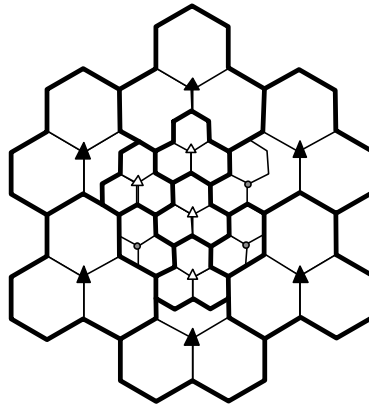
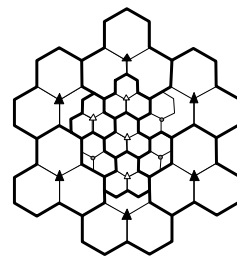


Рис. 1.4. Топология сети с расщеплением сот

В целях максимально эффективного использования частотного ресурса в сетях мобильной радиосвязи применяют *динамическое распределение каналов*, когда рабочие каналы закрепляют не за абонентами, а за вызовами. По мере поступления заявок на установление соединения абонентам в соответствии с приоритетом и очередностью выделяют свободные рабочие каналы. По мере их освобождения банк свободных рабочих каналов вновь пополняется.

ГЛАВА 2



Многостанционный доступ в системах мобильной радиосвязи

2.1. Принципы многостанционного доступа в системах мобильной радиосвязи

Одной из основных проблем построения систем мобильной радиосвязи является решение задачи доступа многих пользователей к ограниченному ресурсу среды передачи. Число каналов базовых станций ограничено. По назначению эти каналы могут быть служебными и трафиковыми, по которым передаются команды и информация.

К *служебным* относятся каналы, обеспечивающие поддержку функционирования абонентской сети и назначение каналов трафика подвижным абонентам на этапе вхождения в связь.

Трафиковые каналы предназначены для передачи информации и команд, обеспечивающих процессы ведения связи с требуемым качеством и восстановления связи (хэндовер) при перемещениях подвижных абонентов по зоне обслуживания.

Задачей многостанционного доступа (уплотнения, мультиплексирования) является разделение между абонентскими станциями таких параметров, как пространство, время, частота и код с минимумом взаимных помех и максимальным использованием характеристик передающей среды.

По способам предоставления системного ресурса абонентам систем мобильной радиосвязи существуют следующие варианты многостанционного доступа [41]:

- ◆ с пространственным разделением каналов;
- ◆ с частотным разделением каналов;
- ◆ с временным разделением каналов;
- ◆ с кодовым разделением каналов.

Многостанционный доступ с *пространственным разделением каналов* (Space Division Multiple Access, SDMA) — это метод доступа, при котором вся зона обслуживания разбивается на множество узких областей, охватываемых отдельными лучами диаграмм направленности антенн. Связь между абонентами, работающими в разных зонах, осуществляется за счет межлучевой коммутации. При этом каждая

абонентская станция может вести передачу только в границах одной определенной территории, на которой любому другому устройству запрещено передавать свои сообщения. Еще недавно данный метод считался малоэффективным, до тех пор, пока не получили развитие системы, обеспечивающие достаточно точную локализацию зон отдельных передатчиков. С появлением аппаратуры (и соответствующих стандартов), обеспечивающей адаптивную перестройку мощности передатчиков абонентских и базовых станций, а также систем на основе секторных антенн (или антенн с перестраиваемой диаграммой направленности), данный метод получил широкое распространение.

Многостанционный доступ с частотным разделением каналов (Frequency Division Multiple Access, FDMA) характерен тем, что каждая абонентская станция работает на строго определенной частоте, благодаря чему множество устройств могут вести передачу данных на одной территории. Исторически это наиболее ранний метод уплотнения каналов, так или иначе используемый в самых современных системах беспроводной связи. Характерной особенностью многостанционного доступа с частотным разделением каналов является наличие защитных полос между соседними каналами, что уменьшает количество возможных каналов и, соответственно, спектральную эффективность системы. Ширина полосы канала зависит от требуемого качества передачи информации. Главным недостатком этого метода является неоправданное расходование частотных ресурсов, поскольку требуется выделение отдельной частоты для каждой абонентской станции.

Многостанционный доступ с временным разделением каналов (Time Division Multiple Access, TDMA) — это метод доступа, при котором все абоненты передают свои сообщения на одной несущей частоте, но в разные, как правило, циклически повторяющиеся интервалы времени при жестких требованиях к синхронизации процесса передачи. Таким образом, абонентской станции в течение фиксированных интервалов времени предоставляется вся пропускная способность канала. Основная единица времени называется *кадром* (frame). Каждый кадр разделен на фиксированное количество *временных интервалов* (slot). Максимально возможное количество одновременно обслуживаемых абонентов равно количеству временных интервалов в кадре. Обычно количество абонентов меньше, т. к. часть временных интервалов используется для передачи сигналов управления, контроля и синхронизации. Поэтому кадры часто организуются в структуры более высокого порядка (мультикадры, суперкадры и т. д.). Недостатком многостанционного доступа с временным разделением каналов является то, что если канал не используется для передачи в выделенный ему временной интервал, другие каналы не могут передавать данные в это время. Тем не менее подобная схема достаточно удобна, т. к. временные интервалы могут динамично перераспределяться между устройствами сети. Так, устройствам с высоким трафиком назначаются более длительные интервалы, чем устройствам с меньшим объемом трафика.

Основной недостаток систем с временным уплотнением — это мгновенная потеря информации при срыве синхронизации в канале, например, из-за сильных помех. Временное уплотнение возможно только для цифрового сигнала. Метод TDMA требует наличия защитных временных промежутков между блоками данных, занимающих соседние временные интервалы. Это обусловлено конечным временем включения оборудования и прохождения сигнала по радиоканалу. В ре-