



М.В.РАТЫЦКИЙ

ОСНОВЫ СОТОВОЙ СВЯЗИ

Под редакцией Д.Б.ЗИМИНА



МОСКВА
«РАДИО И СВЯЗЬ»
1998

УДК 621.396.931(024)
ББК 32.88
Р25

Ратынский М. В.
Р25 Основы сотовой связи / Под ред. Д. Б. Зимина – М.:
Радио и связь, 1998. – 248 с.; ил.
ISBN 5-256-01389-0.

В систематизированном виде изложены все основные аспекты современной сотовой связи: история, принципы построения, технические проблемы, характеристики основных стандартов и рынка (мирового и российского), перспективы развития. Описаны набор услуг и прочие потребительские характеристики, дается обзор других систем подвижной связи.

Для инженерно-технических работников, профессионально занимающихся сотовой связью, может быть полезна потребителям, учащимся высших и средних специальных учебных заведений, специализирующимся в области связи, а также всем тем, кто интересуется различными направлениями современного технического прогресса или новыми предложениями, появляющимися на рынке услуг.

ББК 32.88

Производственное издание

Ратынский Михаил Владимирович

Основы сотовой связи

Редактор М. М. Лисина
Обложка художника В. Г. Ситникова
Художественный и технический редактор С. Ф. Романова
Корректор Т. Г. Тертышная
Компьютерная верстка ТОО «Силуэт»

ИБ № 2812

ЛР № 010164 от 29.01.97

Подписано в печать 29.01.97

Гарнитура SWISS

Тираж 3000 экз

Печать офсетная

Изд. № 24093

Формат 60x90/16

Усл. печ. л. 15,5

Зак. № 90

Усл. кр.-отт. 16,0

Бумага офсетная № 1

Уч.-изд. л. 16,73

С-017

Издательство «Радио и связь», 101000 Москва, Почтамт, а/я 693
Типография издательства «Радио и связь», 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

ISBN 5-256-01389-0

© Ратынский М. В., 1998

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ	10
Глава 1. СОТОВОЙ СВЯЗИ - ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА	12
1 1 Основные даты	12
1 2 Три поколения сотовой связи	13
1 3 Нет ли признаков насыщения?	17
Глава 2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ	19
2 1 Вводные замечания	19
2 2 Функциональная схема и ее элементы	20
2 2 1 Функциональные схема	20
2 2 2 Подвижная станция	24
2 2 3 Базовая станция	28
2 2 4 Центр коммутации	29
2 2 5 Эфирный интерфейс	31
2 2 5 1 Интерфейсы сотовой связи и их стандартизация	31
2 2 5 2 Эфирный интерфейс системы D-AMPS	32
2 2 5 3 Эфирный интерфейс системы GSM	36
2 3 Организация работы системы сотовой связи	39
2 3 1 Частотные, физические и логические каналы	39
2 3 2 Инициализация и установление связи	48
2 3 3 Аутентификация и идентификация	53
2 3 4 Передача обслуживания	55
2 3 5 Роaming	57
2 3 6 Функции сотовой связи	59
2 4 Оптимизация использования частотного диапазона и обработка сигналов	63
2 4 1 Полосы частот сотовой связи	63
2 4 2 Принцип повторного использования частот	65
2 4 3 Методы множественного доступа	68
2 4 3 1 Варианты множественного доступа	68
2 4 3 2 Множественный доступ с частотным разделением	69
2 4 3 3 Множественный доступ с временным разделением	69
2 4 3 4 Множественный доступ с кодовым разделением	70
2 4 3 5 Пути повышения емкости системы сотовой связи	81
2 4 4 Цифровая обработка сигналов	83
2 4 4 1 Роль и построение цифровой обработки	
Характеристики речевых сигналов	83
2 4 4 2 Аналого-цифровое преобразование	85
2 4 4 3 Кодирование речи	87
2 4 4 4 Канальное кодирование	104
2 4 4 5 Модуляция	118

2 4 5 Борьба с влиянием многолучевого распространения	127
2 4 5 1 Многолучевое распространение и его проявления	127
2 4 5 2 Разнесенный прием	129
2 4 5 3 Скачки по частоте	131
2 4 5 4 Эквалайзинг	132
2 5 Сотовая связь как система массового обслуживания	135
2 6 Проблема проектирования систем сотовой связи	141
2 7 Проблемы стандартизации и сертификации	142
2 8 Заключительные замечания	147
Глава 3. СОТОВЫЙ ТЕЛЕФОН С ПОЗИЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ.....	149
3 1 Вводные замечания	149
3 2 Абонентский радиотелефонный аппарат и его возможности	149
3 3 Услуги сотовой связи	152
3 4 Конфиденциальность связи	155
3 5 Фрод в сотовой связи	158
3 6 Биологическая безопасность	164
Глава 4. СОТОВАЯ СВЯЗЬ В СООПЛАЩЕНИИ С ДРУГИМИ ВИДАМИ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ.....	171
4 1 Вводные замечания	171
4 2 Транковая связь	171
4 3 Персональные радиовызов (пейджинг)	174
4 4 Мобильная спутниковая связь	176
4 5 Беспроводной телефон и локальные беспроводные сети	184
4 6 Система подвижной связи PHS	191
4 7 В чем секрет успеха сотовой связи?	193
Глава 5. СОТОВАЯ СВЯЗЬ СЕГОДНЯ.....	194
5 1 Основные стандарты сотовой связи	194
5 2 Характеристики мирового рынка сотовой связи	199
5 3 Сотовая связь в России	207
Глава 6. КАК БУДЕТ РАЗВИВАТЬСЯ СОТОВАЯ СВЯЗЬ?.....	214
6 1 Оценки и прогнозы	214
6 2 Персональная связь и третье поколение мобильной связи	219
6 3 Сотовая связь и информационные сети	224
6 4 Проблемы и решения	228
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	230
Приложение СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ.....	232
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	240

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Настоящая книга открывает серию «Библиотека сотовой связи», выпускаемую издательством «Радио и связь» совместно с группой компаний «ВымпелКом», выступающей под торговой маркой «Би Лайн». Библиографический рынок по сотовой связи в России несравненно беднее, чем, например, в Западной Европе или США. Поэтому первая книга серии «Основы сотовой связи» охватывает широкий спектр вопросов, давая общее представление о сотовой связи и захватывая некоторые смежные вопросы. Надеемся, что последующие выпуски серии будут посвящены более узким направлениям, которые будут рассмотрены полнее.

Сотовая связь молода, и не только в масштабах развития новых технологий, но и по чисто человеческим меркам: ей всего 26 лет от момента формулировки идеи, а от начала коммерческого применения, т.е. от появления на свет – и того меньше. Сотовая связь – прекрасный пример возникновения и чрезвычайно быстрого развития нового технологического направления, оптимальным образом использующего новейшие технические достижения и удовлетворяющего разнообразные и очень актуальные потребности рынка. За короткий срок своего существования сотовая связь претерпела радикальные качественные преобразования – от аналоговых систем первого поколения с множеством несовместимых национальных стандартов к более совершенным цифровым системам второго поколения с рядом межнациональных стандартов и значительной их унификацией, и уже в наши дни и в ближайшем будущем – к системам мобильной связи третьего поколения с глобальным охватом, интеграцией со спутниковой связью и информационными сетями, с передачей мультимедиа и обслуживанием массового рынка. Число абонентов сотовой связи в мире сегодня близко к 200 миллионам, а уровень проникновения в лидирующих странах – к 40 %, и это не предел. Число абонентов к 2001 – 2002 гг. прогнозируется до 500 – 600 миллионов, а уровень проникновения в 2005 г. – до 75 %, т.е. больше, чем проникновение проводной связи в передовых странах сегодня.

В нашей стране развитие сотовой связи началось с опозданием примерно на 10 лет по сравнению с ведущими странами и на фоне общих экономических трудностей идет нелегко. В то же время России удастся, не повторяя всего эволюционного пути, выйти сразу на современные технологии, т.е. более или менее отслеживать основные направления прогресса. АО «ВымпелКом» в этом отношении является характерным примером. Компания вышла на российский рынок сотовой связи не в числе самых первых – в июне 1994 г., спустя три с половиной года после начала ком-

мерческой эксплуатации первой сети. Но она получила в наследство значительную часть научно-технического потенциала Радиотехнического института им. акад. А. Л. Минца и некоторых других родственных ему предприятий, нашла надежных зарубежных партнеров, объединила усилия энтузиастов и профессионалов в сильном коллективе, и за прошедшие три с половиной года сумела добиться неплохих результатов. Начав с аналогового стандарта AMPS, уже осенью 1994 г. компания перешла на его цифровую модификацию D-AMPS. Построенная в этом стандарте сеть – крупнейшая в России – охватывает Москву и почти всю Московскую область и начинает выходить в смежные области. В 1995 г. создана Ассоциация-800 – объединение предприятий, занимающихся развитием и эксплуатацией сетей стандарта AMPS/D-AMPS в России и других странах СНГ. В ноябре 1996 г. акции компании были выставлены на торгах Нью-Йоркской фондовой биржи. Это первая и пока единственная российская компания на Нью-Йоркской бирже после более чем 90-летнего перерыва. В июне 1997 г. запущена в опытно-коммерческую эксплуатацию сеть стандарта GSM 1800 – первая в России сеть персональной связи. Торговая марка «Би Лайн» известна не только в Москве и России, но и за пределами страны. Хотя сегодня основной для компании является операторская деятельность, она не ограничивается только ею: разрабатываются и производятся элементы аппаратуры сотовой связи (антенны, источники питания), исключительно своими силами осуществляется проектирование сетей, причем в этом непростом деле имеются заметные успехи, а в будущем предполагается развернуть более широкие исследования и разработки.

Выпуск серии «Библиотека сотовой связи» мы рассматриваем как полезный и необходимый именно сегодня вклад в распространение и развитие сотовой связи в России и других странах СНГ.

*Д. Б. Зимин,
Генеральный директор АО
«ВымпелКом»*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сотовая связь – весьма заметное явление в технике связи, даже по меркам фантастически богатой на смелые технические проекты второй половины XX века. Появившись в 1971 г. на уровне идеи, в 1978 г. в виде первой опытной сети и достигнув к 1985 г. роли самостоятельной, но достаточно узкой по распространению системы с двумя сотнями тысяч абонентов, сегодня это – массовая система радиотелефонной связи с подвижными объектами, использующая более чем в 140 странах всех континентов и охватывающая более 150 млн. абонентов. Сотовая связь предоставляет широчайший спектр услуг: передача речи и данных, в том числе с выходом на стационарные (фиксированные) телефонные сети, включая междугородные и международные; идентификация подлинности абонента; автоматическая регистрация сеанса связи и начисление оплаты; поиск подвижного абонента и установление с ним связи и многое другое. Более того, сотовая связь продолжает бурно развиваться и имеет реальные шансы стать одним из основных элементов универсальной системы мобильной связи глобального масштаба.

Более важным, вероятно, является даже не абсолютное число абонентов сотовой связи, а относительная обеспеченность ею населения. Сегодня в лидирующих странах она составляет 20...35 % (Скандинавия, Австралия, Израиль, США, Япония). Для сравнения приведем уровень обычной телефонизации: в среднем в мире 10...12 %, в ведущих странах 50...60 %. По имеющимся прогнозам в ближайшие 10 – 15 лет обеспеченность населения средствами подвижной телефонной связи в промышленно развитых странах может достигнуть 50...80 %, т.е. мобильный телефон станет не менее распространенным, чем стационарный проводной. При этом помимо удовлетворения пользовательского спроса сотен миллионов людей появляется огромный дополнительный рынок труда с высокой интеллектуальной насыщенностью. И если сегодня сотовый телефон во многих странах еще остается элитарным средством связи, то это никак не противоречит приведенному прогнозу. Ведь практически все революционные технические новшества – проводной телефон, телевизор, магнитофон и даже часы – при своем появлении были элитарными, а сегодня они совершенно естественно входят в быт каждого человека с детства.

В России сотовая связь начала внедряться с 1990 г. При этом у нас в значительной мере сразу используются современные технические решения, что позволяет, не повторяя всего эволюционного пути развития, быстрее выйти на уровень последних мировых достижений. Однако при таком технически совершенном и быстро

расширяющемся применении сотовой связи в России библиографический рынок в этой части пока остается бедным. Конечно, он уже далеко не тот, что был два года назад, когда кроме перевода книги Ли [50], выпущенного в 1985 г. (оригинал издан в США в 1982 г.), нескольких обзоров [26, 54, 49] и полтора десятков статей сослаться было не на что. С тех пор вышло несколько книг [56, 38, 27], статьи по сотовой связи регулярно публикуются в журналах «Вестник связи», «Электросвязь», «Мир связи и информации: Сопест!» и ряде других. С конца 1996 года выходит специализированный журнал «Мобильные системы». И все же это не идет ни в какое сравнение с Западной Европой и США, где ежегодно появляются десятки книг, в том числе такие, как 800-страничный справочник по сотовой связи [88], 800-страничная монография по мобильной связи [162], 400-страничная монография по системе GSM [156], 200-страничное руководство по маркетингу в области сотовой связи [163], и многие другие, а также сотни статей и патентов. Настоящая книга должна по замыслу автора в некоторой степени заполнить этот пробел в российском информационном пространстве.

Каково же, более конкретно, целевое назначение книги, на какие категории читателей она рассчитана?

Во-первых, автор хочет объяснить, что такое сотовая связь и какое место она занимает среди многих других систем связи. Этим цели служат краткий исторический обзор и сопоставление с другими системами, а также характеристики рынка сотовой связи и попытки прогноза ее развития. В этом отношении книга не лишена оттенка популяризации и может, как нам кажется, представлять интерес для всех, кому небезразличны многочисленные аспекты современного технического прогресса. Во-вторых, автор пытается кратко, но по возможности систематично изложить принципы построения систем сотовой связи и пути решения основных возникающих при этом технических проблем. В этой части книга рассчитана на более узких специалистов и, возможно, – при ограниченном числе других пособий – на студентов высших и средних специальных учебных заведений. В-третьих, автор был бы рад помочь потенциальным потребителям найти необходимый им вид связи, а компаниям, предоставляющим услуги сотовой связи, – их потенциальных абонентов. С этой целью мы рассматриваем потребительские характеристики сотовой связи, хотя и все остальное содержание книги имеет самое прямое отношение к решению этой задачи. Нам не хотелось бы, чтобы последний аспект воспринимался как своего рода реклама; мы подходим к этому вопросу шире, надеясь, в частности, оказать посильное содействие приобщению России к одному из достижений современной мировой цивилизации.

Разумеется, попытка объединить в одном издании столь разнородные цели по меньшей мере достаточно смела. Каждый из перечисленных аспектов достоин отдельной книги, и, вероятно, не одной. Так, скорее всего, и получится уже в недалеком будущем. Пока же приходится поступать в соответствии с правилом «лучшее – враг хорошего».

Основное внимание в книге уделено *цифровым* системам сотовой связи (а не *аналоговым*), как более перспективным, а из цифровых – использующим метод множественного доступа с временным разделением каналов (TDMA), как более распространенным в настоящее время. При этом все основные аналоговые стандарты и другие методы множественного доступа также находят в книге свое отражение. Основанием к тому является стремление найти определенный компромисс между полнотой содержания и уходом от чрезмерной детализации при сохранении доступности изложения в ограниченном объеме книги (подробнее поясним это в разд. 2). По тем же причинам книга ни в какой мере не может служить техническим описанием какой-либо из систем сотовой связи или ее отдельных элементов – она для этого совершенно не предназначена, но мы надеемся, что предварительное знакомство с ней в некоторых случаях может помочь в работе с такими описаниями. Кроме того, сотовая связь развивается настолько быстро, что уже одно это делает чрезмерную детализацию бессмысленной. Особенно быстро изменяются количественные показатели рынка. Мы закончили работу над книгой в декабре 1997 г., и там, где это не оговорено особо, количественные характеристики относятся к середине 1997 г. Конечно, ко времени выхода книги многие из них уже будут требовать обновления, но, к сожалению, здесь мы вынуждены принимать ситуацию такой, какая она есть. Что касается терминологии, то сотовая связь «пришла» в Россию на английском языке, и русская терминология во многом еще не устоялась. В некоторых случаях приходится заимствовать англоязычные термины – *роминг*, *фрод*, *рейк-приемник*, причем нам кажется целесообразным сохранить и устоявшиеся аббревиатуры: FDMA, TDMA, CDMA, ISDN. Для некоторых терминов предлагаются русские эквиваленты: *передача обслуживания* (*handoff* или *handover*), *домашний регистр* (*home location register*), *гостевой регистр* (*visitor location register*). В некоторых случаях подбор русского эквивалента неоднозначен; например, термин *services* в зависимости от контекста переводится как *функции*, *услуги* или *службы*.

В представляемом виде книга не может не иметь недостатков – и по полноте охвата предмета, и по методике изложения, и по фактическому содержанию. Тем не менее мы идем на риск, предложив ее в таком виде, полагая, что ущерб от задержки выпуска может быть еще большим. Мы готовы принять любые критические замечания и по содержанию книги, и по ее оформлению и постараемся учесть их в дальнейшем. Мы будем особенно благодарны за конструктивные отклики, содержащие конкретные пожелания и предложения.

Не имея возможности поименно перечислить всех, кто своим участием способствовал появлению этой книги, автор выражает глубокую и искреннюю благодарность всем коллегам по работе за многочисленные советы, помощь в подборе материала и оформлении книги, без которых ее подготовка и выпуск были бы просто невозможны.

ВВЕДЕНИЕ

Сотовая связь – это общедоступная (если не считать цены) телефонная связь, рассчитанная на обслуживание подвижных абонентов, причем сегодня уже не только бизнесменов и автомобилистов, предоставляющая все виды услуг обычной телефонной связи. Для передачи информации используется радиоканал, т.е. сотовая связь является радиотелефонной связью, а в ее названии иногда используются словосочетания типа «подвижная (или мобильная) радиотелефонная связь». В короткой истории сотовой связи – от идеи, высказанной в 1971 г., и первой опытной системы 1978 г. до применения практически во всех странах мира сегодня – небезынтересен сам феномен ее чрезвычайно быстрого развития и распространения, бурно продолжающегося в настоящее время. Поэтому прежде всего в разд. 1 мы кратко излагаем историю развития сотовой связи. При этом вполне может возникнуть вопрос: не исчерпала ли себя сотовая связь при столь стремительном развитии, нет ли признаков насыщения рынка? Сразу укажем, что ответом на этот вопрос является определенное «нет!», а более подробную аргументацию отложим до разд. 1. «Секреты» успеха сотовой связи мы постараемся объяснить в разд. 4, а перспективы ее дальнейшего развития – в разд. 6.

Следующий по очередности вопрос: что же такое сотовая связь? Что скрывается за этим несколько интригующим названием, как она устроена и насколько сложна? Этим вопросам посвящен разд. 2, который неизбежно оказывается наиболее технически насыщенным. Если некоторым читателям он покажется недостаточно интересным или чрезмерно сложным, его смело можно пропустить, понимание остального материала от этого пострадает не слишком сильно. Зато для определенной группы читателей второй раздел, мы надеемся, окажется наиболее интересным. Из него, в частности, видно, что в разработку систем сотовой связи вложено немало интеллекта и труда многих талантливых инженеров и ученых, и поле для приложения усилий продолжает оставаться весьма широким.

Хотя в технических проблемах сотовой связи много нового, важного и поучительного, они, конечно, интересны не всем. Совершенно иное положение в этом смысле занимает разд. 3, в котором сотовая связь рассматривается с позиции пользователя. Здесь затронуты такие вопросы, как набор предоставляемых услуг, обеспечение конфиденциальности связи, биологическая безопасность сотовой связи. Нам представляется, что этот раздел, в отличие от всех остальных, в той или иной степени не обойдет своим вниманием ни один из читателей.

Познакомившись таким образом, хотя и без чрезмерных подробностей, с «кухней» сотовой связи, естественно задаться вопросом: а нужно ли «городить весь этот огород»? Нет ли чего попроще и подешевле? Опять отвечаем сразу же: конечно, есть! И в разд. 4 рассказываем и о том, что подешевле (транковая связь и персональный радиовывоз), и о том, что недешево, но обладает большими возможностями (мобильная спутниковая связь), и о том, что в какой-то мере сотовой связи родственно (беспроводной телефон), хотя родство это не очень близкое. И в заключение раздела пытаемся пояснить, благодаря чему сотовой связи удастся выстоять при такой конкуренции. А что выстоять удастся – в этом сомнений нет, об этом свидетельствуют объективные показатели.

Разобравшись с историей, техникой и потребительскими характеристиками сотовой связи, мы переходим к характеристикам рынка (разд. 5). Сначала мы приводим характеристики основных стандартов (систем) сотовой связи – аналоговых и цифровых, затем – характеристики распространения сотовой связи в мире и наконец – характеристики рынка сотовой связи России, который значительно уже мирового, но зато представляет для нас непосредственный практический интерес. Приводимые сведения в значительной мере являются справочными и могут, по нашему мнению, помочь сориентироваться в непростой обстановке современного рынка сотовой связи тем, для кого это нужно и полезно.

В заключительном разделе мы попытались в какой-то мере очертить пути дальнейшего развития сотовой связи. На этом этапе возникают новые проблемы, которые потребуют новых поисков и усилий, но, будучи решенными, дадут еще более мощные и удобные средства человеческого общения.

Помимо основного текста мы включили в книгу приложение, в котором приведен перечень специальных терминов и сокращений, в изобилии встречающихся в публикациях по сотовой связи. Опыт показывает, что для работающих с литературой (а мы надеемся, что среди читателей книги их будет немало) наличие под рукой справочных сведений такого рода существенно облегчит жизнь.

Этим мы завершаем обзор содержания книги, и пусть каждый читатель сам определит, какие разделы и в какой мере представляют для него интерес, а заодно и оценит, насколько автору удалось воплотить все задуманное.

Глава 1 СОТОВОЙ СВЯЗИ – ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА

1.1. Основные даты

Сотовая связь еще очень молода – ее идея была предложена в 1971 г. в США как ответ на насущную необходимость развития широкой сети подвижной радиотелефонной связи в условиях жестких ограничений на доступные полосы частот. Однако этому, как сейчас уже ясно, революционному скачку предшествовал 50-летний период эволюционного развития, в течение которого осваивались различные частотные диапазоны и совершенствовалась техника связи.

Первое использование подвижной радиотелефонной связи в США относится к 1921 г.: полиция Детройта использовала одностороннюю диспетчерскую связь в диапазоне 2 МГц для передачи информации от центрального передатчика к приемникам, установленным на автомашинах. В 1933 г. полиция Нью-Йорка начала использовать систему двусторонней подвижной радиотелефонной связи также в диапазоне 2 МГц. В 1934 г. Федеральная комиссия связи США выделила для радиотелефонной связи 4 канала в диапазоне 30...40 МГц, и в 1940 г. радиотелефонной связью пользовались уже около 10 тысяч полицейских автомашин. Во всех этих системах использовалась амплитудная модуляция. Частотная модуляция начала применяться с 1940 г. и к 1946 г. полностью вытеснила амплитудную. Первый общественный подвижный радиотелефон появился в 1946 г. (Сент-Луис, США; фирма Bell Telephone Laboratories), в нем использовался диапазон 150 МГц. В 1955 г. начала работать 11-канальная система в диапазоне 150 МГц, а в 1956 г. – 12-канальная система в диапазоне 450 МГц. Обе эти системы были симплексными, и в них использовалась ручная коммутация. Автоматические дуплексные системы начали работать соответственно в 1964 г. (150 МГц) и в 1969 г. (450 МГц).

Аналогичным образом, с естественными отличиями и в меньших масштабах, развивалась ситуация и в других странах. Так, в Норвегии общественная радиотелефонная связь использовалась в качестве морской мобильной связи с 1931 г.; в 1955 г. в стране было 27 береговых радиостанций. Наземная мобильная связь начала развиваться после второй мировой войны в виде частных сетей с ручной коммутацией. Таким образом, к 1970 г. подвижная радиотелефонная связь, с одной стороны, уже получила достаточно широкое распространение, но с другой – явно не успевала за быстро растущими потребностями, при ограниченном числе каналов в

жестко определенных полосах частот. Выход был найден в виде системы сотовой связи, что позволило резко увеличить емкость за счет повторного использования частот в системе с ячеечной структурой.

Конечно, как это обычно бывает в жизни, отдельные элементы системы сотовой связи существовали и раньше. В частности, некоторое подобие сотовой системы использовалось в 1949 г. в Детройте (США) диспетчерской службой такси – с повторным использованием частот в разных ячейках при ручном переключении каналов пользователями в оговоренных заранее местах. Однако архитектура той системы, которая сегодня известна как система сотовой связи, была изложена только в техническом докладе компании Bell System, представленном в Федеральную комиссию связи США в декабре 1971 г. И с этого времени начинается развитие собственно сотовой связи, которое стало поистине триумфальным с 1985 г., в последние десять с небольшим лет.

В 1974 г. Федеральная комиссия связи США приняла решение о выделении для сотовой связи полосы частот в 40 МГц в диапазоне 800 МГц; в 1986 г. к ней было добавлено еще 10 МГц в том же диапазоне. В 1978 г. в Чикаго начались испытания первой опытной системы сотовой связи на 2 тыс. абонентов. Поэтому 1978 год можно считать годом начала практического применения сотовой связи. Первая автоматическая коммерческая система сотовой связи была введена в эксплуатацию также в Чикаго в октябре 1983 г. компанией American Telephone and Telegraph (AT&T). В Канаде сотовая связь используется с 1978 г., в Японии – с 1979 г., в Скандинавских странах (Дания, Норвегия, Швеция, Финляндия) – с 1981 г., в Испании и Англии – с 1982 г. По состоянию на июль 1997 г. сотовая связь работала более чем в 140 странах всех континентов, обслуживая более 150 млн. абонентов. В России сотовая связь начала внедряться с 1990 г., коммерческое использование – с 1991 г., к июлю 1997 г. число абонентов составило около 300 тысяч. К характеристикам современного рынка сотовой связи мы еще вернемся в разд. 5, где рассмотрим их более подробно.

1.2. Три поколения сотовой связи

Несмотря на то, что история сотовой связи насчитывает лишь немногим более 25 лет, за этот период с ней успели произойти довольно существенные изменения, и не только количественные, но и качественные, которые продолжаются и в настоящее время. Это дает основание говорить, с известной степенью условности, о трех поколениях систем сотовой связи:

- первое поколение – аналоговые системы, уходящие в прошлое;
- второе поколение – цифровые системы сегодняшнего дня;
- третье поколение – универсальные системы мобильной связи недалекого будущего.

Все первые системы, или, как еще говорят, стандарты, сотовой связи были аналоговыми. К ним относятся:

- AMPS (Advanced Mobile Phone Service – усовершенствованная мобильная телефонная служба, диапазон 800 МГц) – широко используется в США, Канаде, Центральной и Южной Америке, Австралии; известен также как «североамериканский стандарт»; это наиболее распространенный стандарт в мире, обслуживающий почти половину всех абонентов сотовой связи (вместе с цифровой модификацией D-AMPS, речь о которой впереди); используется в России в качестве регионального стандарта (в основном – в варианте D-AMPS), где он также является наиболее распространенным;
- TACS (Total Access Communications System – общедоступная система связи, диапазон 900 МГц) – используется в Англии, Италии, Испании, Австрии, Ирландии, с модификациями ETACS (Англия) и JTACS/NTACS (Япония); это второй по распространенности стандарт среди аналоговых; еще недавно, в 1995 г., он занимал и общее второе место в мире по величине абонентской базы, но в 1997 г. оттеснен на четвертое место более быстро развивающимися цифровыми стандартами;
- NMT 450 и NMT 900 (Nordic Mobile Telephone – мобильный телефон северных стран, диапазоны 450 и 900 МГц соответственно) – используется в Скандинавии и во многих других странах; известен также как «скандинавский стандарт»; третий по распространенности среди аналоговых стандартов мира; стандарт NMT 450 является одним из двух стандартов сотовой связи, принятых в России в качестве федеральных (второй – цифровой стандарт GSM 900);
- C-450 (диапазон 450 МГц) – используется в Германии и Португалии;
- RTMS (Radio Telephone Mobile System – мобильная радиотелефонная система, диапазон 450 МГц) – используется в Италии;
- Radiocom 2000 (диапазоны 170, 200, 400 МГц) – используется во Франции;
- NTT (Nippon Telephone and Telegraph system – японская система телефона и телеграфа, диапазон 800...900 МГц – в трех вариантах) – используется в Японии.

Во всех аналоговых стандартах применяются частотная модуляция для передачи речи и частотная манипуляция для передачи информации управления (или *сигнализации* – *signaling*). Для передачи информации различных каналов используются различные участки спектра частот – применяется метод множественного доступа с частотным разделением каналов (Frequency Division Multiple Access – FDMA), с полосами каналов в различных стандартах от 12,5 до 30 кГц. С этим непосредственно связан основной недостаток аналоговых систем – относительно низкая емкость, являющаяся прямым следствием недостаточно рационального использования выделенной полосы частот при частотном разделении каналов. Этот недостаток стал очевиден уже к середине 80-х годов, в самом начале широкого распространения сотовой связи в ведущих стра-

нах, и сразу же значительные силы были направлены на поиск более совершенных технических решений. В результате этих усилий и поисков появились цифровые сотовые системы второго поколения. Переход к цифровым системам сотовой связи стимулировался также широким внедрением цифровой техники в связь в целом и в значительной степени был обеспечен разработкой низкоскоростных методов кодирования и появлением сверхминиатюрных интегральных схем для цифровой обработки сигналов.

Вместе с тем переход к цифровым системам натолкнулся и на известные трудности.

В США аналоговый стандарт AMPS получил столь широкое распространение, что прямая замена его цифровым оказалась практически невозможной. Выход был найден в разработке двухрежимной аналого-цифровой системы, позволяющей совмещать работу аналоговой и цифровой систем в одном и том же диапазоне. Работа над соответствующим стандартом была начата в 1988 г. и закончена в 1992 г.; стандарт получил наименование D-AMPS, или IS-54 (IS – сокращение от Interim Standard, т.е. «промежуточный стандарт»). Его практическое использование началось в 1993 г. В Европе ситуация осложнялась наличием множества несовместимых аналоговых систем («лоскутное одеяло»). Здесь выходом оказалась разработка единого общеевропейского стандарта GSM (GSM 900 – диапазон 900 МГц). Соответствующая работа была начата в 1982 г., к 1987 г. были определены все основные характеристики системы, а в 1988 г. приняты основные документы стандарта. Практическое применение стандарта началось с 1991 г. Еще один вариант цифрового стандарта, по техническим характеристикам схожий с D-AMPS, был разработан в Японии в 1993 г.; первоначально он назывался JDC, а с 1994 г. – PDC (Personal Digital Cellular – буквально «персональная цифровая сотовая связь»).

Но на этом развитие цифровых систем сотовой связи не остановилось.

Стандарт D-AMPS дополнительно усовершенствовался за счет введения нового типа каналов управления. Дело в том, что цифровая версия IS-54 сохранила структуру каналов управления аналогового AMPS, что ограничивало возможности системы. Новые чисто цифровые каналы управления введены в версии IS-136, которая была разработана в 1994 г. и начала применяться в 1996 г. При этом была сохранена совместимость с AMPS и IS-54, но повышена емкость канала управления и заметно расширены функциональные возможности системы. Стандарт GSM, продолжая совершенствоваться технически (последовательно вводимые фазы 1, 2 и 2+), в 1989 г. пошел на освоение нового частотного диапазона 1800 МГц. Это направление известно под названием системы персональной связи. Отличие последней от исходной системы GSM 900 не столько техническое, сколько маркетинговое при технической поддержке: более широкая рабочая полоса частот в сочетании с меньшими размерами ячеек (сот) позволяет строить сотовые сети значительно большей емкости, и именно расчет на массовую систему мобильной связи с относительно компактными,

легкими, удобными и недорогими абонентскими терминалами был заложен в основу этой системы. Соответствующий стандарт (в виде дополнений к исходному стандарту GSM 900) был разработан в Европе в 1990 – 1991 гг. Система получила название DCS 1800 (Digital Cellular System – цифровая система сотовой связи; первоначально использовалось также наименование PCN – Personal Communications Network, что в буквальном переводе означает «сеть персональной связи») и начала использоваться с 1993 г. В 1996 г. было принято решение именовать ее GSM 1800. В США диапазон 1800 МГц оказался занят другими пользователями, но была найдена возможность выделить полосу частот в диапазоне 1900 МГц, которая получила в Америке название диапазона систем персональной связи (PCS – Personal Communications Systems), в отличие от диапазона 800 МГц, за которым сохранено название сотового (cellular). Освоение диапазона 1900 МГц началось с конца 1995 г.; работа в этом диапазоне предусмотрена стандартом D-AMPS (версия IS-136, но аналогового AMPS в диапазоне 1900 МГц уже нет), и разработана соответствующая версия стандарта GSM («американский» GSM 1900 – стандарт IS-661).

Все перечисленные выше цифровые системы второго поколения основаны на методе множественного доступа с временным разделением каналов (Time Division Multiple Access – TDMA). Однако уже в 1992 – 1993 гг. в США был разработан стандарт системы сотовой связи на основе метода множественного доступа с кодовым разделением каналов (Code Division Multiple Access – CDMA) – стандарт IS-95 (диапазон 800 МГц). Он начал применяться с 1995 – 1996 гг. в Гонконге, США, Южной Корее, причем в Южной Корее – наиболее широко, а в США начала использоваться и версия этого стандарта для диапазона 1900 МГц. Направление персональной связи нашло свое преломление и в Японии, где в 1991 – 1992 гг. была разработана и с 1995 г. начала широко использоваться система PHS диапазона 1800 МГц (Personal Handyphone System – буквально «система персонального ручного телефона»).

Таким образом, основными цифровыми стандартами сотовой связи можно считать следующие:

- D-AMPS (Digital AMPS – цифровой AMPS; диапазоны 800 МГц и 1900 МГц); иногда употребляется наименование NA TDMA – «североамериканский TDMA»;
- GSM (Global System for Mobile communications – глобальная система мобильной связи, диапазоны 900, 1800 и 1900 МГц) – это уже второй по распространенности стандарт мира, обслуживающий более четверти всех абонентов;
- CDMA (Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением каналов, диапазоны 800 и 1900 МГц).

Что касается систем мобильной связи третьего поколения, то ведущаяся по ним работа еще далека от завершения, и их окончательный облик пока не определен. Можно, однако, утверждать, что сотовая связь будет продолжать развиваться, включая качественное совершенствование, и интегрироваться с другими ви-

дами подвижной связи, с расширением масштабов связи, вплоть до глобального. Мы вернемся к этому вопросу в разделе 6, познакомившись предварительно в разд. 4 с такими видами связи, как мобильная спутниковая связь и беспроводной телефон. В последующих разделах мы рассмотрим подробнее и многие другие из затронутых здесь вопросов, в том числе методы множественного доступа и цифровой обработки сигналов, характеристики основных стандартов и современного рынка сотовой связи, а также прогнозы и перспективы ее дальнейшего развития.

1.3. Нет ли признаков насыщения?

Вопрос о возможном насыщении рынка сотовой связи является вполне естественным в условиях столь бурного ее развития и распространения, особенно за последние 10...12 лет. Можно, однако, уверенно констатировать, что признаков насыщения нет сегодня и не ожидается в обозримом будущем. Основанием к такому выводу могут служить три следующих обстоятельства.

Первое: исходя из общих соображений и учитывая удобство использования сотовой связи — как в сфере бизнеса, так и в быту, можно утверждать, что ее ниша далека от заполнения. Для стран типа России, сравнительно недавно приобщившихся к сотовой связи, это очевидно. Для стран типа США, где сотовой связью пользуется около 20% населения (в Скандинавии и Австралии — более 30%), это может показаться не столь очевидным, но если учесть, что средний уровень обычной телефонизации там составляет более 50...60 %, мы приходим к тому же выводу: резервы для расширения сотовой связи далеко не исчерпаны.

Второй аргумент основывается на анализе динамики развития сотовой связи за последние годы. В качестве примера на рис. 1.1, 1.2 и 1.3 показан рост числа абонентов в мире и в отдельных странах; для других стран эти зависимости имеют сходный характер. Видно, что эффекта насыщения нет и не предвидится.

Третье обстоятельство — профессиональные прогнозы, основанные на соответствующих исследованиях и проработке. Детали разных прогнозов заметно различаются, но все они, без исключения, предсказывают дальнейший рост и расширение рынка сотовой связи, разумеется, при значительной качественной эволюции последней. Более подробно об имеющихся прогнозах мы расскажем в разд. 6.

Таким образом, опасаться насыщения рынка сотовой связи оснований пока нет.

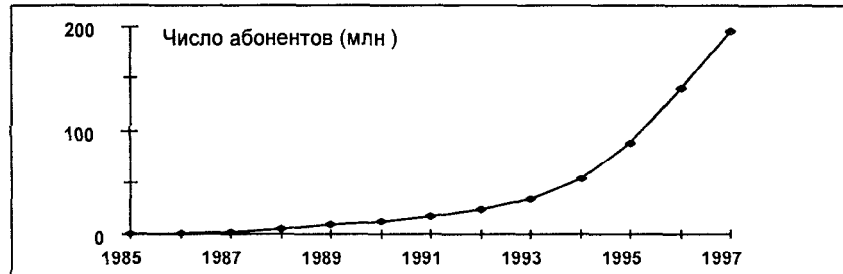


Рис.1 1 Рост числа абонентов сотовой связи в мире

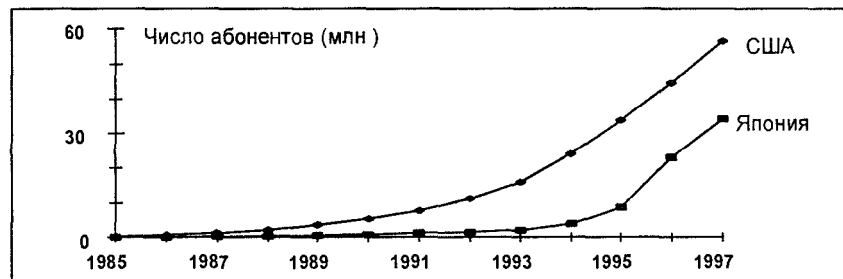


Рис 1 2. Рост числа абонентов сотовой связи в США и Японии

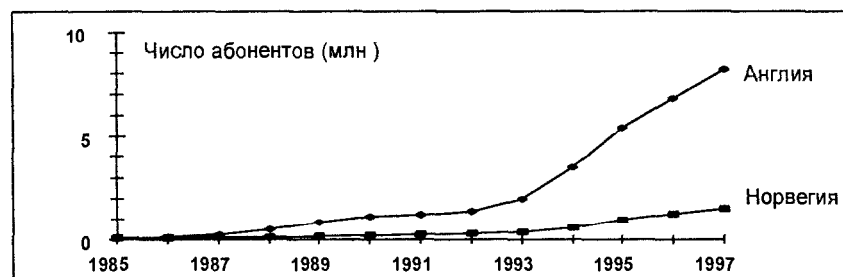


Рис.1 3 Рост числа абонентов сотовой связи в Англии и Норвегии

Глава 2

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ

2.1. Вводные замечания

Система сотовой связи – это сложная и гибкая техническая система, допускающая большое разнообразие как по вариантам конфигурации, так и по набору выполняемых функций. В качестве примера *сложности и гибкости* системы укажем, что она может обеспечивать передачу как речи, так и других видов информации, в частности факсимильных сообщений и компьютерных данных. В части передачи речи, в свою очередь, может быть реализована обычная двусторонняя телефонная связь, многосторонняя телефонная связь (так называемая конференц-связь – с участием в разговоре более двух абонентов одновременно), голосовая почта. При организации обычного двустороннего телефонного разговора, начинающегося с вызова, возможны режимы автодозвона, ожидания вызова, переадресации вызова (условной или безусловной). Ограничимся пока перечисленным, а дополнительные примеры сформулированного выше тезиса мы будем встречать на протяжении всего разд. 2. Более подробное рассмотрение возможностей системы и видов услуг будет приведено в разд. 2.3.6 и 3.3. Акцентируя внимание на термине *техническая*, мы имеем в виду, что любые принципиальные решения воплощаются в виде некоторой вполне конкретной технической реализации, которая может быть существенно различной не только для разных стандартов сотовой связи, но даже для одного и того же стандарта, но в исполнении разных фирм.

Приступая к изложению принципов построения и технических основ сотовой связи, мы оказываемся перед проблемой: в каком ключе и с какой степенью подробности вести изложение? Одна крайность – изложение голых идей, без всякого намека на привязку к технике. В этом случае, очевидно, мы получаем книгу минимального объема, но трудно читаемую и с сомнительной практической ценностью. Другая крайность – изложение с жесткой привязкой к технике и всеми подробностями различных вариантов реализации. При этом, однако, книга будет восприниматься еще тяжелее – читатель просто утонет в дебрях технических деталей, не говоря уже об объеме, который окажется неприемлемо большим.

Мы выбираем нечто среднее, более близкое, пожалуй, к первому варианту. В частности, мы ограничиваемся:

- схематичным представлением структуры системы, лишь кратко упоминая о некоторых возможных модификациях;
- передачей информации речи при обычной двусторонней радиотелефонной связи, почти не затрагивая вопросов передачи других видов информации;
- цифровыми системами сотовой связи с TDMA, уделяя аналоговым системам, а также цифровым системам с CDMA, минимум места и внимания.

В качестве конкретных примеров мы обращаемся к стандартам D-AMPS и GSM. В результате, как нам кажется, удается получить приемлемый компромисс по степени подробности, доходчивости изложения, практической полезности и объему книги.

2.2. Функциональная схема и ее элементы

2.2.1. Функциональная схема

Система сотовой связи строится в виде совокупности ячеек, или сот, покрывающих обслуживаемую территорию, например территорию города с пригородами. Ячейки обычно схематически изображают в виде равновеликих правильных шестиугольников (рис.2.1), что по сходству с пчелиными сотами и послужило поводом назвать систему сотовой. Ячеечная, или сотовая, структура системы непосредственно связана с принципом повторного использования частот – основным принципом сотовой системы, определяющим эффективное использование выделенного частотного диапазона и высокую емкость системы. Принцип повторного использования частот мы рассмотрим в разд. 2.4, а пока будем просто полагать ячеечную схему удобным вариантом иерархического построения системы, принимая на веру утверждение о его преимуществах. В центре каждой ячейки находится базовая станция, обслуживающая все подвижные станции (абонентские радиотелефонные аппараты) в пределах своей ячейки (рис 2.2). При перемещении абонента из одной ячейки в другую происходит передача его обслуживания от одной базовой станции к другой. Все базовые станции системы, в свою очередь, замыкаются на центр коммутации, с которого имеется выход во Взаимоувязанную сеть связи (ВСС) России, в частности, если дело происходит в городе, – выход в обычную городскую сеть проводной телефонной связи. На рис 2.3 приведена функциональная схема, соответствующая описанной структуре системы.

Отметим теперь некоторые моменты, связанные с упрощенностью изложенного выше схематичного представления.

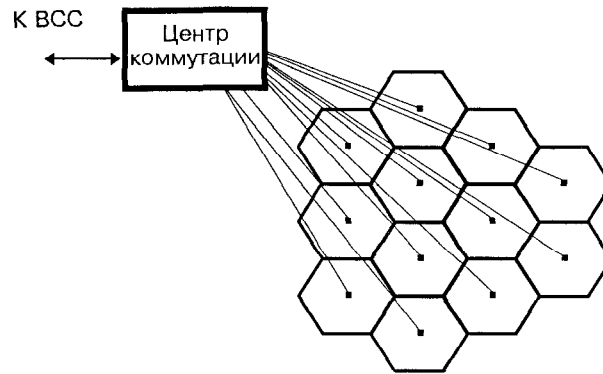


Рис.2.1. Ячейки (соты) системы, покрывающие всю обслуживаемую территорию

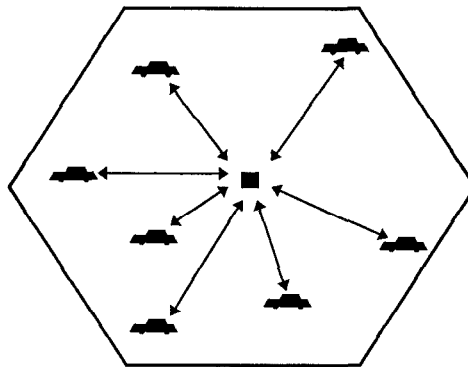


Рис 2 2 Одна ячейка с базовой станцией в центре, обслуживающей все подвижные станции в ячейке

Прежде всего, в действительности ячейки никогда не бывают строгой геометрической формы. Реальные границы ячеек имеют вид неправильных кривых, зависящих от условий распространения и затухания радиоволн, т.е. от рельефа местности, характера и плотности растительности и застройки и тому подобных факторов. Более того, границы ячеек вообще не являются четко определен-

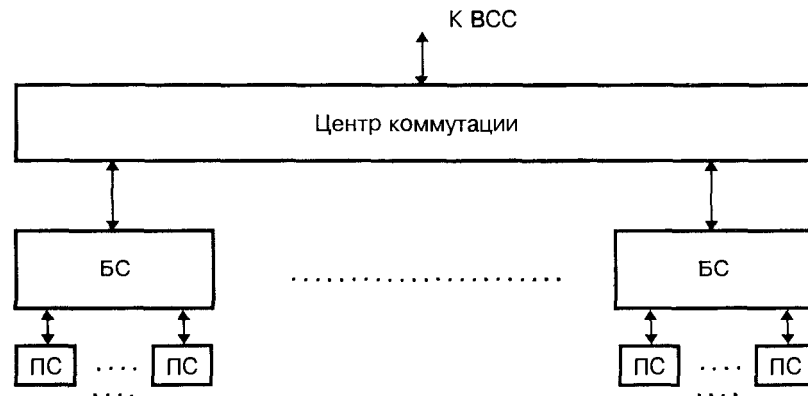


Рис.2.3. Упрощенная функциональная схема системы сотовой связи:
БС – базовая станция; ПС – подвижная станция (абонентский радиотелефонный аппарат)

ными, так как рубеж передачи обслуживания подвижной станции из одной ячейки в соседнюю может в некоторых пределах смещаться с изменением условий распространения радиоволн и в зависимости от направления движения подвижной станции. Точно так же и положение базовой станции лишь приблизительно совпадает с центром ячейки, который к тому же не так просто определить однозначно, если ячейка имеет неправильную форму. Если же на базовых станциях используются направленные (не изотропные в горизонтальной плоскости) антенны, то базовые станции фактически оказываются на границах ячеек.

Далее, система сотовой связи может включать более одного центра коммутации, что может быть обусловлено, в частности, эволюцией развития системы или ограниченностью емкости коммутатора. Возможна, например, структура системы типа показанной на рис.2.4 – с несколькими центрами коммутации, один из которых условно можно назвать «головным» или «ведущим».

В такой ситуации может возникнуть вопрос: что же такое система сотовой связи, чем определяются ее границы? Иначе говоря, как понять, где заканчивается одна система и начинается другая? Ответ такой: система – это то, что замыкается на один общий *домашний регистр* (см. разд. 2.2.4 и 2.3.4, 2.3.5). В простейшей ситуации система содержит один центр коммутации (рис.2.3), при котором имеется домашний регистр, и она обслуживает относительно небольшую замкнутую территорию («небольшой город»), с которой не граничат территории, обслуживаемые другими системами. Если, условно говоря, «город побольше», то система может содержать два или более центров коммутации (рис.2.4), из которых только при «головном» имеется домашний регистр, но обслуживаемая системой территория по-прежнему не граничит с терри-

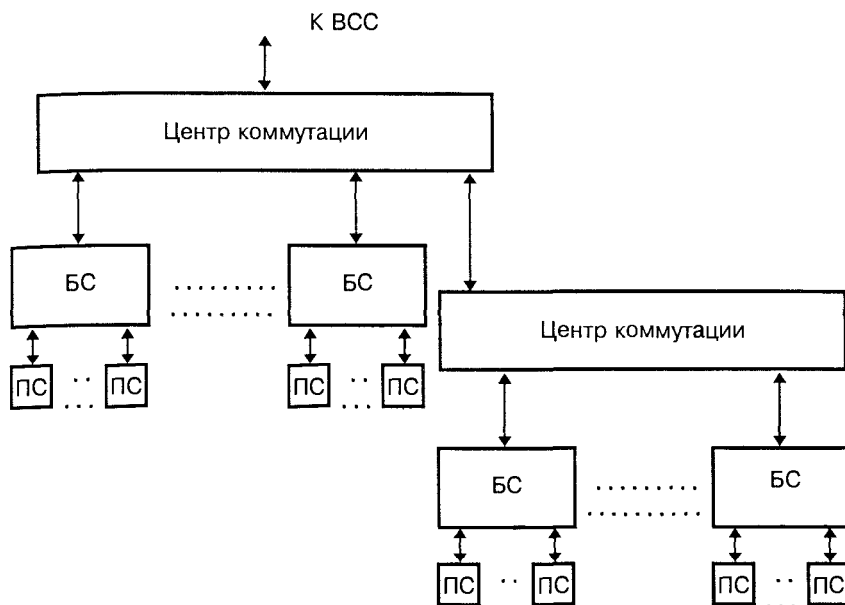


Рис.2.4. Система сотовой связи с двумя центрами коммутации

ториями других систем. В обоих этих случаях при перемещении абонента между ячейками одной системы происходит передача обслуживания, а при перемещении на территорию другой системы – роaming. Наконец, если «город совсем большой», на его площади может оказаться несколько систем с граничащими территориями, каждая система – со своим домашним регистром. В таком случае при перемещении абонента из одной системы в другую может иметь место и так называемая межсистемная передача обслуживания. Как для роamingа, так и для межсистемной передачи обслуживания необходима аппаратная совместимость систем (принадлежность их к одному и тому же стандарту сотовой связи), а также наличие соответствующих соглашений между компаниями-операторами.

Еще одна особенность связана с построением базовой станции. В стандарте GSM используется понятие система базовой станции (СБС), в которую входит контроллер базовой станции (КБС) и несколько, например до шестнадцати, базовых приемопередающих станций (БППС) – рис.2.5. В частности, три БППС, расположенные в одном месте и замыкающиеся на общий КБС, могут обслуживать каждая свой 120-градусный азимутальный сектор в пределах ячейки (соты) или шесть БППС с одним КБС – шесть 60-

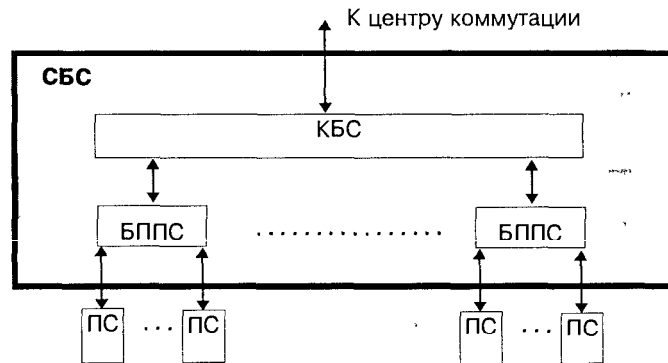


Рис.2.5. Система базовой станции стандарта GSM:

СБС – система базовой станции; КБС – контроллер базовой станции;
БППС – базовая приемо-передающая станция; ПС – подвижная станция

градусных секторов. В стандарте D-AMPS в аналогичном случае могут использоваться соответственно три или шесть независимых базовых станций, каждая со своим контроллером, расположенных в одном месте и работающих каждая на свою секторную антенну; для обозначения такой «строеной» или «ушестеренной» конфигурации иногда употребляется термин *позиция ячейки*, или *позиция соты (cell site)*, хотя чаще наименование *cell site* является синонимом базовой станции.

Число примеров такого рода схематизма и упрощений на самом деле гораздо больше, но мы ограничимся пока приведенными пояснениями к функциональной схеме и, имея их в виду, перейдем к рассмотрению отдельных элементов системы. При этом, если не оговаривается иное, будем адресоваться к простейшей схеме рис.2.3, чтобы не потерять за деталями основной логической нити рассуждений.

2.2.2. Подвижная станция

Рассмотрение элементов системы сотовой связи начнем с подвижной станции – наиболее простого по функциональному назначению и устройству, к тому же единственного элемента системы, который не только реально доступен пользователю, но и находится у него в руках в буквальном смысле этого слова.

Блок-схема подвижной станции приведена на рис.2.6. В ее состав входят:

- блок управления;
- приемопередающий блок;
- антенный блок.

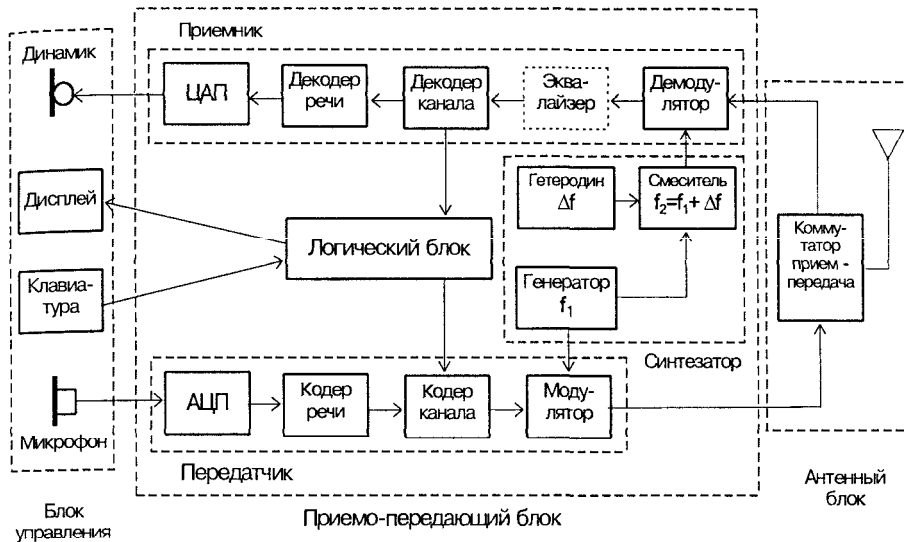


Рис.2.6. Блок-схема подвижной станции (абонентского радиотелефонного аппарата)

Приемопередающий блок, в свою очередь, включает передатчик, приемник, синтезатор частот и логический блок.

Наиболее прост по составу антенный блок: он включает собственно антенну – в простейшем случае четвертьволновой штырь – и коммутатор прием-передача. Последний для цифровой станции может представлять собой электронный коммутатор, подключающий антенну либо на выход передатчика, либо на вход приемника, поскольку, как будет ясно из дальнейшего, подвижная станция цифровой системы никогда не работает на прием и передачу одновременно.

Функционально несложен и блок управления. Он включает микротелефонную трубку – микрофон и динамик, клавиатуру и дисплей. Клавиатура (наборное поле с цифровыми и функциональными клавишами) служит для набора номера телефона вызываемого абонента, а также команд, определяющих режим работы подвижной станции. Дисплей служит для отображения различной информации, предусматриваемой устройством и режимом работы станции. Некоторое представление как о типах команд, так и о характере отображаемой информации дает содержание разд. 3.2.

Приемопередающий блок значительно сложнее.

В состав передатчика входят:

аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – преобразует в цифровую форму сигнал с выхода микрофона и вся последу-

- ющая обработка и передача сигнала речи производится в цифровой форме, вплоть до обратного цифро-аналогового преобразования;
- кодер речи осуществляет кодирование сигнала речи – преобразование сигнала, имеющего цифровую форму, по определенным законам с целью сокращения его избыточности, т.е. с целью сокращения объема информации, передаваемой по каналу связи;
 - кодер канала – добавляет в цифровой сигнал, получаемый с выхода кодера речи, дополнительную (избыточную) информацию, предназначенную для защиты от ошибок при передаче сигнала по линии связи; с той же целью информация подвергается определенной переупаковке (перемежению); кроме того, кодер канала вводит в состав передаваемого сигнала информацию управления, поступающую от логического блока;
 - модулятор – осуществляет перенос информации кодированного видеосигнала на несущую частоту.
- Приемник по составу в основном соответствует передатчику, но с обратными функциями входящих в него блоков:
- демодулятор выделяет из модулированного радиосигнала кодированный видеосигнал, несущий информацию;
 - декодер канала выделяет из входного потока управляющую информацию и направляет ее на логический блок; принятая информация проверяется на наличие ошибок, и выявленные ошибки по возможности исправляются; до последующей обработки принятая информация подвергается обратной (по отношению к кодеру) переупаковке;
 - декодер речи восстанавливает поступающий на него с кодера канала сигнал речи, переводя его в естественную форму, со свойственной ему избыточностью, но в цифровом виде;
 - цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) преобразует принятый сигнал речи в аналоговую форму и подает его на вход динамика;
 - эквалайзер служит для частичной компенсации искажений сигнала вследствие многолучевого распространения; по существу, он является адаптивным фильтром, настраиваемым по обучающей последовательности символов, входящей в состав передаваемой информации; блок эквалайзера не является, вообще говоря, функционально необходимым и в некоторых случаях может отсутствовать.
- Заметим, что для сочетания кодера и декодера иногда употребляют наименование *кодек* (например, *канальный кодек*, *речевой кодек*).

В разд. 2.4.4 мы вернемся к методам кодирования и модуляции, используемым в сотовой связи, и рассмотрим их подробнее, а в разд. 2.4.5 познакомимся с принципом работы эквалайзера.

Помимо собственно передатчика и приемника, в приемопередающий блок входят логический блок и синтезатор частот. Логи-

ческий блок – это по сути микрокомпьютер со своей оперативной и постоянной памятью, осуществляющий управление работой подвижной станции. Характер выполняемых им функций будет примерно понятен после знакомства с разд. 2.3. Синтезатор является источником колебаний несущей частоты, используемой для передачи информации по радиоканалу. Наличие гетеродина и преобразователя частоты обусловлено тем, что для передачи и приема используются различные участки спектра (так называемое дуплексное разделение по частоте). Конкретные значения частот и полосы каналов, используемые в различных стандартах, мы приведем в разд. 2.3.1 и 5.1.

В заключение раздела отметим еще несколько моментов. Блок-схема рис.2.6 является существенно упрощенной. На ней не показаны усилители, селектирующие цепи, генераторы сигналов синхрочастот и цепи их разводки, схемы контроля мощности на передачу и прием и управления ею, схема управления частотой генератора для работы на определенном частотном канале и т.п. Для обеспечения конфиденциальности передачи информации в некоторых системах возможно использование режима шифрования; в этих случаях передатчик и приемник подвижной станции включают соответственно блоки *шифрования* и *дешифровки* сообщений. В подвижной станции системы GSM предусмотрен специальный съемный модуль *идентификации абонента* (Subscriber Identity Module – SIM). Некоторая дополнительная информация по режиму шифрования и использованию модуля SIM будет приведена в разд. 2.3.3 и 3.4.

Подвижная станция системы GSM включает также так называемый *детектор речевой активности* (Voice Activity Detector), который в интересах экономного расходования энергии источника питания (уменьшения средней мощности излучения), а также снижения уровня помех, неизбежно создаваемых для других станций при работающем передатчике, включает работу передатчика на излучение только на те интервалы времени, когда абонент говорит. На время паузы в работе передатчика в приемный тракт дополнительно вводится так называемый *комфортный шум*. В необходимых случаях в подвижную станцию могут входить отдельные терминальные устройства, например факсимильный аппарат, в том числе подключаемые через специальные адаптеры с использованием соответствующих интерфейсов.

Если представить блок-схему аналоговой подвижной станции, то она будет проще рассмотренной цифровой за счет отсутствия блоков АЦП/ЦАП и кодеков, но сложнее за счет более громоздкого дуплексного антенного переключателя, поскольку аналоговой станции приходится одновременно работать на передачу и на прием.

2.2.3. Базовая станция

Многие элементы, входящие в состав базовой станции, по функциональному назначению не отличаются от аналогичных элементов подвижной станции, но в целом базовая станция существенно больше и сложнее подвижной, что соответствует ее месту в системе сотовой связи.

Блок-схема базовой станции приведена на рис.2.7. Первая особенность базовой станции, которую следует отметить, – это использование разнесенного приема (разд. 2.4.5), для чего станция должна иметь две приемные антенны (на схеме рис.2.7 эта особенность не отражена). Кроме того, базовая станция может иметь отдельные антенны на передачу и на прием (схема рис.2.7 соответствует этому случаю). Вторая особенность – наличие нескольких приемников и такого же числа передатчиков, позволяющих вести одновременную работу на нескольких каналах с различными частотами.

Одноименные приемники и передатчики имеют общие перестраиваемые опорные генераторы (не показанные на рис.2.7), обеспечивающие их согласованную перестройку при переходе с одного канала на другой; конкретное число N приемопередатчиков зависит от конструкции и комплектации базовой станции. Для обеспечения одновременной работы N приемников на одну приемную и N передатчиков на одну передающую антенну между приемной антенной и приемниками устанавливается делитель мощности на N выходов, а между передатчиками и передающей антенной – сумматор мощности на N входов.

Приемник и передатчик имеют в общем ту же структуру, что и в подвижной станции (рис. 2.6), за исключением того, что здесь в них отсутствуют соответственно ЦАП и АЦП, поскольку и входной сигнал передатчика, и выходной сигнал приемника имеют цифровую форму. Возможны варианты, когда кодеки – либо только кодек речи, либо и кодек речи, и канальный кодек – конструктивно реализуются в составе центра коммутации, а не в составе приемопередатчиков базовой станции, хотя функционально они остаются элементами приемопередатчиков.

Блок сопряжения с линией связи осуществляет упаковку информации, передаваемой по линии связи на центр коммутации, и распаковку принимаемой от него информации. В качестве линии связи базовой станции с центром коммутации обычно используется радиорелейная или волоконно-оптическая линия, если базовая станция и центр коммутации не располагаются территориально в одном месте.

Контроллер базовой станции, представляющий собой достаточно мощный и совершенный компьютер, обеспечивает управление работой станции, а также контроль работоспособности всех входящих в нее блоков и узлов.

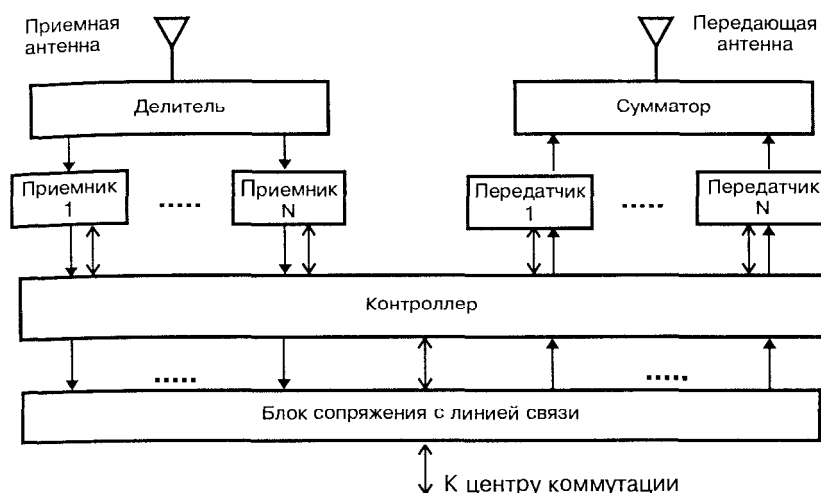


Рис.2.7. Блок-схема базовой станции

Для обеспечения достаточной степени надежности многие блоки и узлы базовой станции резервируются (дублируются), в состав станции включаются автономные источники бесперебойного питания (аккумуляторы). Поскольку аппаратура базовой станции потребляет значительную мощность, и соответственно выделяет заметное количество тепла, в ней предусматриваются специальные устройства охлаждения. Все эти элементы, как и ряд других, не являющихся в известном смысле существенными для пояснения принципов работы станции, на схеме рис.2.7 не показаны.

2.2.4. Центр коммутации

Центр коммутации является мозговым центром и одновременно диспетчерским пунктом системы сотовой связи, на который замыкаются потоки информации со всех базовых станций и через который осуществляется выход на другие сети связи – стационарную телефонную сеть, сети междугородной связи, спутниковой связи, другие сотовые сети. В состав центра коммутации входит несколько процессоров (контроллеров), и он является типичным примером многопроцессорной системы.

Блок-схема центра коммутации представлена на рис.2.8. Собственно коммутатор осуществляет переключение потоков информации между соответствующими линиями связи. Он может, в частности, направить поток информации от одной базовой станции к другой, или от базовой станции к стационарной сети связи, или наоборот – от стационарной сети связи к нужной базовой станции.

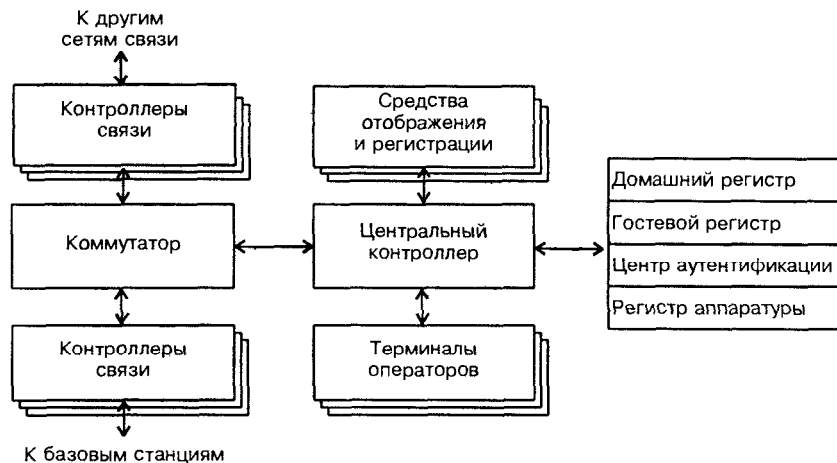


Рис.2.8. Блок-схема центра коммутации

Коммутатор подключается к линиям связи через соответствующие контроллеры связи, осуществляющие промежуточную обработку (упаковку/распаковку, буферное хранение) потоков информации. Общее управление работой центра коммутации и системы в целом производится от центрального контроллера, который имеет мощное математическое обеспечение, включающее перепрограммируемую часть (*software*). Работа центра коммутации предполагает активное участие операторов, поэтому в состав центра входят соответствующие терминалы, а также средства отображения и регистрации (документирования) информации. В частности, оператором вводятся данные об абонентах и условиях их обслуживания, исходные данные по режимам работы системы, в необходимых случаях оператор выдает требующиеся по ходу работы команды.

Важными элементами системы являются базы данных – домашний регистр, гостевой регистр, центр аутентификации, регистр аппаратуры (последний имеется не во всех системах). *Домашний регистр* (домашний регистр местоположения – Home Location Register, HLR) содержит сведения обо всех абонентах, зарегистрированных в данной системе, и о видах услуг, которые могут быть им оказаны (при заключении договора на обслуживание для разных абонентов может быть предусмотрено, вообще говоря, оказание различных наборов услуг). Здесь же фиксируется местоположение абонента для организации его вызова и регистрируются фактически оказанные услуги. *Гостевой регистр* (гостевой регистр местоположения – Visitor Location Register, VLR) содержит примерно такие же сведения об абонентах-гостях (ромерах), т.е. об абонентах, зарегистрированных в другой системе, но пользующихся в

настоящее время услугами сотовой связи в данной системе. Организацию процедуры роaming мы рассмотрим в разделе 2.3.5. Центр аутентификации (Authentication Center) обеспечивает процедуры аутентификации абонентов и шифрования сообщений. Регистр аппаратуры (регистр идентификации аппаратуры – Equipment Identity Register), если он существует, содержит сведения об эксплуатируемых подвижных станциях на предмет их исправности и санкционированного использования. В частности, в нем могут отмечаться украденные абонентские аппараты, а также аппараты, имеющие технические дефекты, например являющиеся источниками помех недопустимо высокого уровня. Как и в базовой станции, в центре коммутации предусматривается резервирование основных элементов аппаратуры, включая источник питания, процессоры и базы данных.

В заключение этого раздела еще раз отметим, что структура, показанная на рис.2.8, весьма схематична. В частности, базы данных часто не входят в состав центра коммутации, а реализуются в виде отдельных элементов. Кроме того, устройство центра коммутации может быть существенно различным в исполнении разных компаний-изготовителей. Если интерфейс между центром коммутации и базовыми станциями не соответствует общепринятому стандарту, или такой общепринятый стандарт вообще отсутствует, возникает необходимость использовать базовые станции и центр коммутации одной и той же компании-изготовителя.

2.2.5. Эфирный интерфейс

2.2.5.1. Интерфейсы сотовой связи и их стандартизация

В каждом стандарте сотовой связи используется несколько интерфейсов, в общем случае различных в разных стандартах.

Так, предусмотрены свои интерфейсы для связи подвижной станции с базовой, базовой станции – с центром коммутации (а в стандарте GSM – еще и отдельный интерфейс для связи приемопередатчика базовой станции с контроллером базовой станции), центра коммутации – с домашним регистром, с гостевым регистром, с регистром аппаратуры, со стационарной телефонной сетью и другие. Все интерфейсы подлежат стандартизации для обеспечения совместимости аппаратуры разных фирм-изготовителей, что не исключает, однако, возможности использования различных интерфейсов, определяемых разными стандартами, для одного и того же информационного стыка. В некоторых случаях используются уже существующие стандартные интерфейсы, например, соответствующие протоколам обмена в цифровых информационных сетях.

Из всех интерфейсов, используемых в сотовой связи, один занимает особое место – это интерфейс обмена между подвижной и базовой станциями. Он носит наименование *эфирного интер-*

фейса (английский термин *air interface*) и для обоих основных стандартов цифровой сотовой связи – D-AMPS и GSM – иногда обозначается одинаково – Um, хотя организован совершенно по-разному.

Эфирный интерфейс обязательно используется в любой системе сотовой связи, при любой ее конфигурации и в единственном возможном для своего стандарта сотовой связи варианте. Последнее обстоятельство позволяет подвижной станции любой фирмы-изготовителя одинаково успешно работать совместно с базовой станцией той же или любой другой фирмы, что удобно для компаний-операторов и практически необходимо для организации роуминга, в том числе международного. Стандарты эфирного интерфейса отрабатываются весьма тщательно, чтобы обеспечить возможно более эффективное использование полосы частот, выделенной для канала радиосвязи.

В двух следующих разделах мы рассмотрим эфирные интерфейсы стандартов D-AMPS и GSM и в дальнейшем неоднократно будем ссылаться на приведенные в этих разделах сведения и рисунки. Дополнительные сведения по организации работы эфирного интерфейса мы приведем в разд. 2.3.1.

2.2.5.2. Эфирный интерфейс системы D-AMPS

Начнем со стандарта IS-54. Временная структура его эфирного интерфейса отличается сравнительной простотой (рис.2.9).

Передача информации в канале трафика организуется следующими один за другим *кадрами* (английский термин *frame*; иногда и в русском языке употребляется наименование *фрейм*) длительностью 40 мс. Каждый кадр состоит из шести временных интервалов – *слотов*; длительность слота (6,67 мс) соответствует 324 битам, т.е. длительность одного бита составляет 20,55 мкс. При *полноскоростном кодировании* (английское *full rate coding*) на один речевой канал в каждом кадре отводится два слота, т.е. 20-миллисекундный сегмент речи упаковывается в один слот, длительность которого втрое меньше. При *полускоростном кодировании* (английское *half rate coding*) на один речевой канал отводится один слот в кадре, т.е. упаковка сигнала речи оказывается вдвое более плотной, чем при полноскоростном кодировании; однако, хотя полускоростное кодирование и предусмотрено стандартом, в настоящее время оно еще не реализовано.

Слот имеет несколько различную структуру в *прямом канале* трафика (английское *downlink*) – от базовой станции к подвижной и в *обратном канале* трафика (английское *uplink*) – от подвижной станции к базовой. В обоих случаях на передачу информации собственно речи отводится 260 бит. Еще 52 бита занимает управляющая и вспомогательная информация, назначение которой будет понятно из последующего изложения.

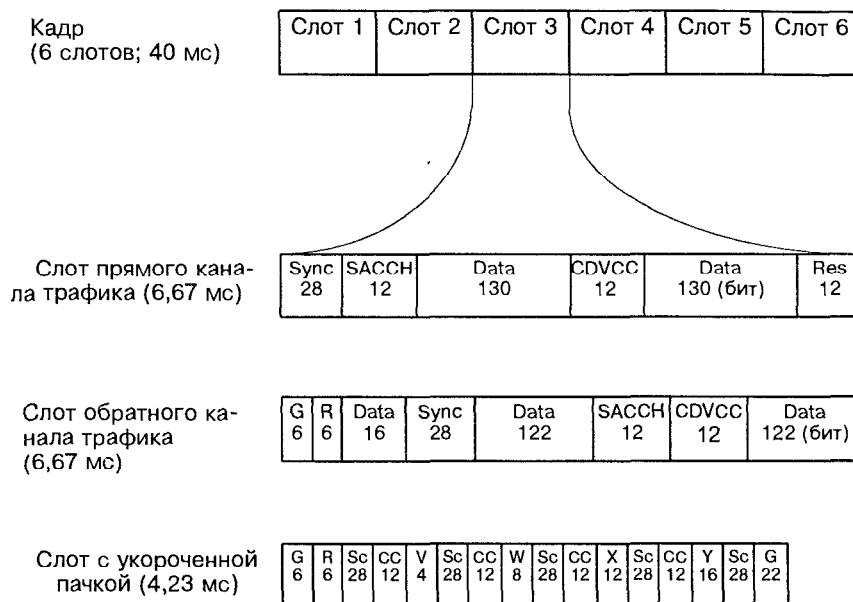


Рис.2.9. Структура кадра и слота системы D-AMPS (канал трафика; стандарт IS-54):

Data – информация речи, Sync (Sc) – синхронизирующая (обучающая) последовательность, SACCH – информация медленного совмещенного канала управления, CDVCC (CC) – кодированный цифровой код подтверждения цвета; G – защитный бланк (Guard time), R – интервал фронта импульса передатчика (Ramp up time), V, W, X, Y – шестнадцатеричные нули, Res – резерв

Пока отметим лишь, что она включает: 28-битовую обучающую последовательность, используемую для идентификации слота в пределах кадра, синхронизации слота во времени и настройки эквалайзера; 12-битовое сообщение сигнализации (контроля и управления) канала SACCH (Slow Associated Control Chappel – медленный совмещенный канал управления); 12-битовое поле кодированного цифрового кода окраски (CDVCC – Coded Digital Verification Color Code), служащего для идентификации подвижной станции при приеме ее сигнала базовой станцией (код назначается базовой станцией индивидуально для каждого канала, т.е. для каждой подвижной станции и ретранслируется последней обратно на базовую), при этом собственно цифровой код окраски занимает 8 бит, а 4 бита контроля добавляются при кодировании его укороченным кодом Хэмминга для защиты от ошибок.

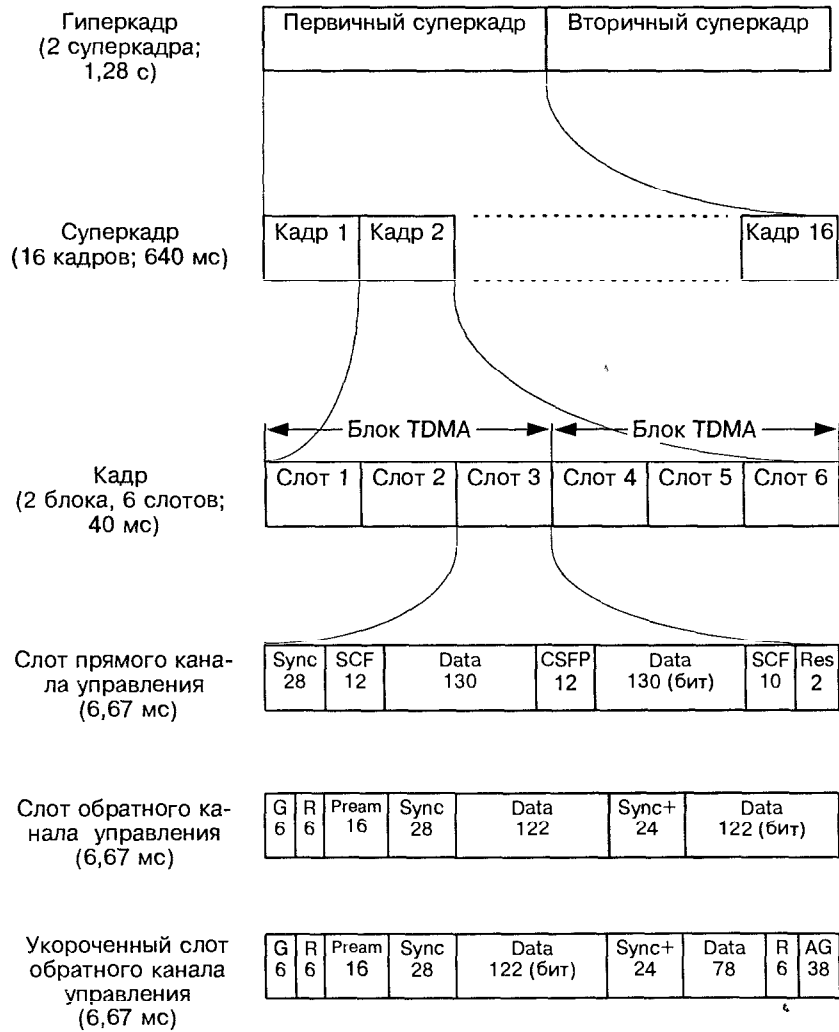


Рис.2.10. Структура эфирного интерфейса системы D-AMPS (канал управления; стандарт IS-136):

Data – информация управления; Sync – синхронизирующая (обучающая) последовательность; Sync+ – дополнительная синхронизирующая последовательность; SCF – общий канал обратной связи (Shared Channel Feedback), CSFP – закодированная фаза суперкадра (Coded Super Frame Phase); G – защитный бланк (Guard time); R – интервал фронта импульса передатчика (Ramp up time); AG – дополнительный защитный бланк укороченного слота; Pream – преамбула (Preamble); Res – резерв.

Оставшиеся 12 бит в прямом канале не используются (составляют резерв), а в обратном канале выполняют функцию защитного интервала, в течение которого не передается никакой полезной информации. Этот интервал включает 6-битовый защитный бланк, позволяющий выравнивать задержку сигнала с не слишком жестким допуском, и 6-битовый интервал фронта, в течение которого мощность передатчика подвижной станции выводится на номинальный уровень. В прямом канале необходимости в защитном интервале не возникает, поскольку выравнивание задержки производится при передаче информации по обратному каналу, а передатчик базовой станции работает непрерывно.

При полностью скоростном кодировании слоты 1 и 4 содержат первый канал речи, слоты 2 и 5 – второй канал речи, слоты 3 и 6 – третий канал речи. При полускоростном кодировании каждый из шести слотов соответствует своему каналу речи. При передаче информации быстрого совмещенного канала управления FACCH эта информация замещает в слоте информацию речи (поле Data).

На начальном этапе установления связи используется укороченный слот, в котором многократно повторяются синхронизирующая последовательность и код CDVCC, разделяемые нулевыми числами различной длины. В конце укороченного слота имеется дополнительный защитный бланк. Подвижная станция передает укороченные слоты до тех пор, пока базовая станция не выберет необходимую временную задержку, определяемую удалением подвижной станции от базовой.

Кроме того, в стандарте IS-54 используются каналы управления, общие с аналоговым стандартом AMPS. Организацию работы этих каналов мы рассмотрим в разд. 2.3.1.

Перейдем к стандарту IS-136. Структура его эфирного интерфейса несколько сложнее. Это определяется тем, что вместо каналов управления, общих с аналоговым стандартом AMPS, введены новые «цифровые» каналы управления с более высокой пропускной способностью и большей функциональной гибкостью (рис.2.10). Для каналов трафика сохранена структура эфирного интерфейса стандарта IS-54 (рис.2.9).

Для цифровых каналов управления принята значительная степень преемственности с каналами трафика, облегчающая технологически переход от IS-54 к IS-136: та же длительность кадра, состоящего из шести слотов, с сохранением возможности полностью скоростного и полускоростного кодирования; та же длительность бита и соответственно те же 324 бита в слоте; сохранены прежние алгоритмы канального кодирования и модуляции, в значительной мере сохранена структура слота. При этом обеспечивается совместимость стандартов снизу вверх. Поясним основные особенности цифровых каналов управления (рис. 2.10). Прежнее назначение осталось у поля синхронизации (Sync) и у защитного интервала обратного канала (поля G, R); резервное поле прямого канала (Res) сокращено до двух бит. Остальные поля слота циф-

рового канала управления отличаются от полей слота канала трафика. Здесь отсутствуют поля SACCH и CDVCC. Добавлено поле Sync+, содержащее дополнительную синхронизирующую последовательность.

В полях Data передается основной объем информации управления, причем в прямом канале объем этой информации в слоте составляет 160 бит, а в обратном – 144 бита. В полях общего канала обратной связи (поля SCF) передается ответная (от базовой станции) информация схемы случайного доступа; эта схема реализует вызов со стороны подвижной станции.

Поле CSFP содержит информацию о фазе суперкадра, которая позволяет определить начало суперкадра, что необходимо для корректного приема управляющей информации; кроме того, по содержанию этого поля, отличающегося от соответствующего поля цифрового канала трафика (поле CDVCC), подвижная станция отличает канал управления от канала трафика. В течение интервала преамбулы, не несущего информации, производятся автоматическая регулировка усиления приемника базовой станции и символическая синхронизация, предшествующие приему последующей информации. В укороченном слоте общий объем управляющей информации составляет 200 бит, а в конце слота введен дополнительный 44-битовый защитный интервал (дополнительные поля R и AG).

2.2.5.3. Эфирный интерфейс системы GSM

Временная структура эфирного интерфейса системы GSM еще сложнее (рис.2.11). Передача информации организуется кадрами, которые имеют длительность 4,615 мс. Каждый кадр состоит из восьми слотов по 577 мкс, и каждый слот соответствует своему каналу речи, т.е. в каждом кадре передается информация восьми речевых каналов. При полноскоростном кодировании все последовательные кадры содержат информацию одних и тех же восьми речевых каналов. При полускоростном кодировании, пока также не реализованном, четные и нечетные кадры содержат информацию разных речевых каналов, т.е. информация одного и того же речевого канала передается через кадр, так что в общей сложности передается информация шестнадцати речевых каналов. Возвращаясь к используемой в настоящее время схеме полноскоростного кодирования, заметим, что информационный кадр может быть одного из двух видов – кадр канала трафика или кадр канала управления (рис.2.11). В обоих случаях он имеет одну и ту же длительность и состоит из 8 слотов, но слоты имеют различную структуру и разное информационное содержание.

На рис.2.11 представлена структура кадра канала трафика при передаче речи. Длительность слота соответствует 156,25 битам, т.е. длительность одного бита составляет 3,69 мкс.

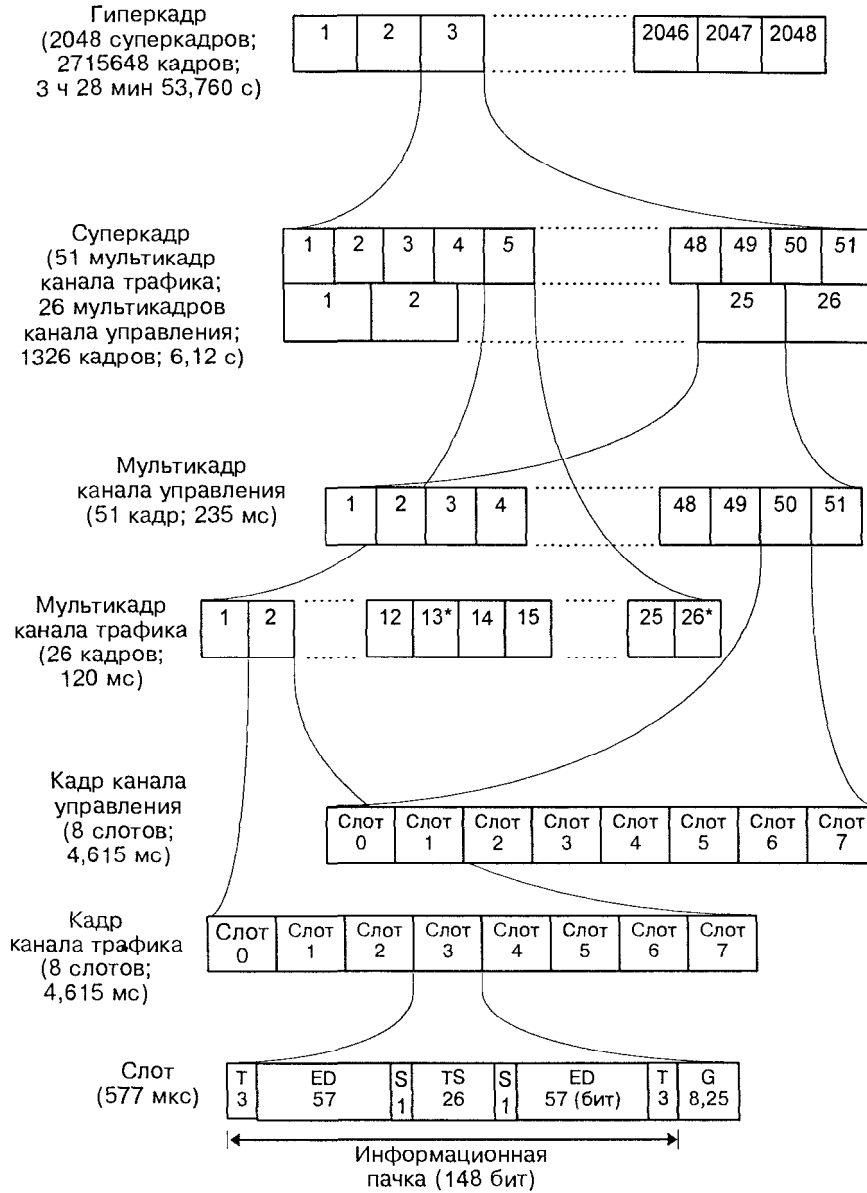


Рис.2.11. Структура эфирного интерфейса (канал трафика) системы GSM:

ED - закодированная информация (Encrypted Data), TS - обучающая последовательность (Training Sequence), T - защитный бланк (Tail bits - хвостовые биты), S - скрытый флажок (Stealing flag) - признак речь/управление; G - защитный интервал (Guard period)

Первые 148 бит слота составляют информационный пакет, или информационную пачку (английский термин *burst* – вспышка); оставшиеся 8,25 бит – защитный интервал. Из 148 бит пачки на передачу информации речи отводится 116 бит (из них 114 бит – на передачу собственно речи и 2 бита – на скрытые флажки, определяющие тип передаваемой информации), 26 бит занимает обучающая последовательность, и оставшиеся 6 бит образуют два 3-битовых защитных бланка по краям пачки.

Структура слота для каналов управления приведена на рис.2.12. При полноскоростном кодировании каждый слот кадра соответствует своему каналу речи. При полускоростном кодировании слоты, соответствующие одному и тому же каналу речи, передаются через кадр.

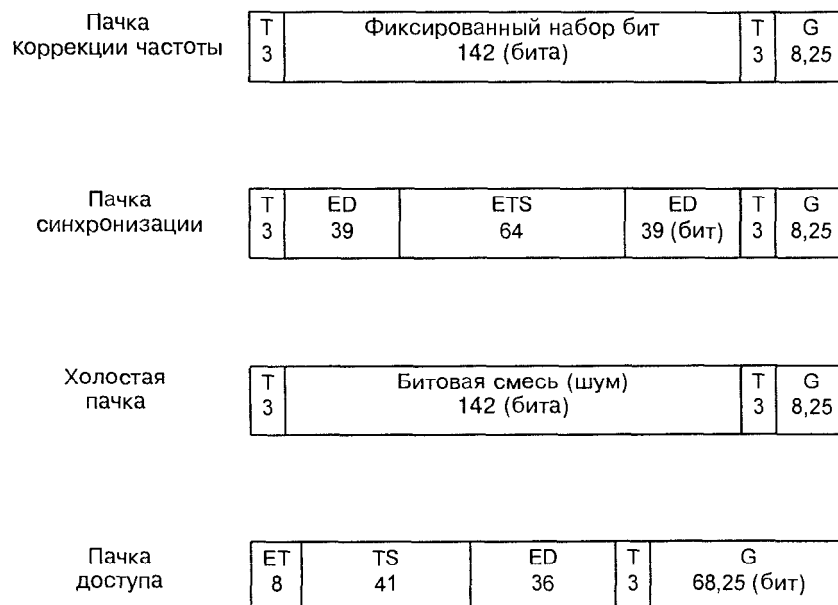


Рис 2.12. Варианты структуры слота каналов управления системы GSM:

ED - закодированная информация (Encrypted Data), TS - обучающая последовательность (Training Sequence), ETS - расширенная обучающая последовательность (Extended Training Sequence), T - защитный бланк (Tail bits - хвостовые биты), ET - расширенный защитный бланк (Extended Tail), G - защитный интервал (Guard period).

Из верхней части рис. 2.11 следует, что информационные кадры объединяются в мультикадры. 26 кадров канала трафика образуют мультикадр канала трафика длительностью 120 мс. При этом в 24 кадрах передается информация речи – это кадры 1...12 и 14...25, в кадре 13 передается информация медленного присоединенного канала управления (канала SACCH), а кадр 26 остается пустым (он зарезервирован для передачи второго сегмента информации канала SACCH при полускоростном кодировании). Мультикадр канала управления имеет длительность 235 мс и состоит из 51 кадра канала управления.

Мультикадры, в свою очередь, объединяются в суперкадры. один суперкадр состоит из 51 мультикадра канала трафика или 26 кадров канала управления. Длительность мультикадра в обоих случаях составляет 6,12 с, или 1326 кадров. Наконец, 2048 суперкадров образуют один гиперкадр (криптографический гиперкадр), имеющий длительность 3 ч 28 мин 53,760 с, или 2715648 кадров. Номер кадра в пределах гиперкадра используется в процессе шифрования передаваемой информации.

2.3. Организация работы системы сотовой связи

2.3.1. Частотные, физические и логические каналы

Прежде чем приступить к описанию организации непосредственно процедур и режимов работы системы сотовой связи, нам придется уделить некоторое внимание организации информационного обмена по эфирному интерфейсу, с которым мы познакомились в разделе 2.2.5. Дело в том, что кроме собственно информации речи по каналу связи должна передаваться так называемая сигнальная информация, или информация *сигнализации* (английский термин *signaling*), включающая информацию управления и информацию контроля состояния аппаратуры; для ее обозначения будем употреблять также наименование *управляющая информация* или просто *управление*. Поэтому в настоящем разделе рассмотрим, как организуется использование каналов связи, и начнем с определения часто употребляемых при этом понятий частотных, физических и логических каналов.

Частотный канал – это полоса частот, отводимая для передачи информации одного канала связи. Правда, как мы фактически уже отмечали ранее, при использовании метода TDMA в одном частотном канале передается информация нескольких каналов связи, т.е. в одном частотном канале размещается несколько физических каналов, но это не противоречит приведенному определению частотного канала, а подробнее мы рассмотрим это ниже – при определении понятия физического канала. Поясним понятие частотного канала конкретными примерами.

В стандарте D-AMPS в США для передачи информации прямого канала (от базовых станций к подвижным) отводится полоса частот 869...894 МГц, а для передачи информации обратного канала – полоса 824...849 МГц, т.е. прямой и обратный каналы разнесены по частоте на 45 МГц (дуплексный разнос по частоте). Один частотный канал занимает полосу $\Delta f = 30$ кГц, так что в пределах выделенного диапазона, с учетом защитных полос по краям, размещается 832 частотных канала. Частотным каналам присвоены номера от 1 до 799 (включительно) и от 991 до 1023; иногда фигурирует и канал с номером 990, но фактически он не используется и не входит в указанное выше число 832 каналов. Центральная частота канала (в МГц) связана с его номером N соотношениями:

обратный канал:

$$f_o = 825,000 + 0,030 N, \quad 1 \leq N \leq 799,$$

$$f_o = 825,000 + 0,030 (N - 1023), \quad 991 \leq N \leq 1023;$$

прямой канал:

$$f_n = 870,000 + 0,030 N, \quad 1 \leq N \leq 799,$$

$$f_n = 870,000 + 0,030 (N - 1023), \quad 991 \leq N \leq 1023.$$

Принятое в США распределение частотных каналов поясняется табл. 2.1.

Таблица 2.1. Распределение частотных каналов стандарта D-AMPS в США

Номера каналов	Число каналов	Полосы частот, МГц		Оператор
		Обратный канал	Прямой канал	
991 – 1023	33	824,025 ..825,015	869,025 ..870,015	А
1 – 312	312	825,015 ..834,375	870,015 ..879,375	А
313 – 333 ¹	21	834,375.. 835,005	879,375..880,005	А
334 – 354 ¹	21	835,005...835,635	880,005...880,635	В
355 – 666	312	835,635...844,995	880,635...889,995	В
667 – 695	29	844,995...845,865	889,995...890,865	А
696 – 716 ²	21	845,865...846,495	890,865...891,495	А
717 – 737 ²	21	846,495...847,125	891,495...892,125	В
738 – 799	62	847,125 ..848,985	892,125...893,985	В

¹ Первичные выделенные каналы управления;

² Вторичные выделенные каналы управления

В качестве пояснения к табл. 2.1 отметим следующее. Понятия «оператор А» и «оператор В» – специфически американские. Они связаны с тем, что в соответствии с законодательством США лицензии на операторскую деятельность в любом регионе выдаются сразу двум компаниям, между которыми и делится пополам отведенный под сотовую связь частотный диапазон. Исторически одна из двух компаний обычно была компанией, оказывающей одновременно услуги проводной телефонной связи (wireline provider, или wireline carrier), – это «оператор В», а другая – компания, специализирующаяся на беспроводной связи (поп-wireline provider, или поп-wireline carrier), – «оператор А».

Разумеется, принятое в США распределение частотных каналов, равно как и выделенный для сотовой связи частотный диапа-

зон, не переносятся автоматически на другие страны, в том числе и на Россию. Однако поток американских публикаций по сотовой связи столь велик, что мы посчитали целесообразным привести изложенные выше сведения, так как без деталей такого рода понимание опубликованного материала бывает затруднительным.

В стандарте GSM 900 для передачи информации прямого канала отводится полоса 935...960 МГц, а обратного – 890...915 МГц, т.е. дуплексный разнос по частоте также составляет 45 МГц. Один частотный канал занимает полосу $\Delta f = 200$ кГц, так что всего в полном диапазоне, с учетом защитных полос, размещается 124 частотных канала. Центральная частота канала (в МГц) связана с его номером N соотношениями:

обратный канал:

$$f_o = 890,200 + 0,200 N, \quad 1 \leq N \leq 124;$$

прямой канал:

$$f_n = 935,200 + 0,200 N, \quad 1 \leq N \leq 124.$$

Заметим, что один частотный канал, строго говоря, занимает две полосы Δf (по 30 или 200 кГц – для стандартов D-AMPS и GSM соответственно) – одну под прямой, а другую под обратный канал связи. При использовании режима работы со скачками по частоте (раздел 2.4.5) для передачи информации одной и той же группы физических каналов последовательно во времени используются различные частотные каналы.

Перейдем к понятию «физический канал».

Физический канал в системе с множественным доступом на основе временного разделения (TDMA) – это временной слот с определенным номером (или пара слотов с номерами, отличающимися на 3 при полноскоростном кодировании в стандарте D-AMPS) в последовательности кадров эфирного интерфейса (рис.2.9, 2.10, 2.11). Таким образом, в одном частотном канале в стандарте D-AMPS при полноскоростном кодировании передается информация трех физических каналов, при полускоростном кодировании – информация шести физических каналов, а в стандарте GSM всегда передается информация восьми физических каналов, но при полускоростном кодировании один физический канал содержит два канала трафика, информация которых передается по очереди, через кадр. Иными словами, при этом реализуется временное уплотнение каналов в 3 или 8 раз соответственно при полноскоростном кодировании и в 6 или 16 раз – при полускоростном. В этом и заключается одно из основных преимуществ цифрового поколения сотовой связи по сравнению с аналоговым.

Логические каналы различаются по виду (составу) информации, передаваемой в физическом канале. В принципе в физическом канале может быть реализован один из двух видов логических каналов – канал *трафика* или канал *управления*; каждый из них, в свою очередь, может в общем случае существовать в одном из нескольких вариантов (типов).

С понятием канала управления мы по существу уже познакомились в начале данного раздела. *Логический канал трафика* – это канал передачи речи или данных (компьютерных данных, факсимильных сообщений), т.е. той информации, ради которой, собственно, и создается сотовая связь. Термин *трафик* происходит от английского *traffic* (информационный поток, поток транспорта) и в применении к связи определяется как совокупность сообщений, передаваемых по линии связи, или как совокупность требований абонентов, обслуживаемых сетью связи. Коль скоро мы договорились, что в рамках данной книги ограничиваемся в основном передачей речи, то канал трафика оказывается для нас тождественным каналу передачи речи.

В стандарте D-AMPS версии IS-54, с его относительно простым эфирным интерфейсом, понятие «логические каналы» обычно не используется. Фактически на рис.2.9 представлена структура слота для логического канала трафика, в котором частично передается и информация управления (поля SACCH, CDVCC, Sync). Логический канал управления здесь по существу представлен укороченной пачкой, используемой на этапе установления связи, и быстрым совмещенным каналом управления FACCH (Fast Associated Control Channel). Информация канала FACCH передается вместо информации речи, т.е. структура слота логического канала управления отличается от структуры слота логического канала трафика заменой поля Data на поле FACCH. Сегмент речи продолжительностью 40 мс при этом просто пропускается (теряется). Допустимая частота замены канала трафика каналом управления не регламентирована, но из общих соображений очевидно, что чем чаще это будет происходить, тем сильнее будет снижаться качество передачи речи. Замена информации речи информацией канала FACCH никак не помечается внутри слота, и характер информации выясняется лишь при ее декодировании.

Кроме того, в стандарте IS-54 используются так называемые выделенные каналы управления (табл.2.1), доставшиеся цифровой (или цифро-аналоговой) системе в наследство от аналоговой AMPS с небольшими дополнениями в части состава передаваемой информации. Эти частотные каналы всегда используются только как каналы управления, т.е. они никогда не бывают каналами трафика. Первичные выделенные каналы управления используются как в аналоговом, так и в цифровом стандарте. Вторичные выделенные каналы управления используются только в цифровом стандарте; в аналоговом стандарте соответствующие частотные каналы использовались как каналы трафика. Обычно для каждой базовой станции назначается один выделенный канал управления.

Информация в выделенных каналах управления передается в цифровой форме с использованием частотной манипуляции (Frequency Shift Keying – FSK) со скоростью 10 кбит/с. Передача информации организуется в виде кадров, длительность и структура которых различна в прямом и обратном каналах (рис.2.13).

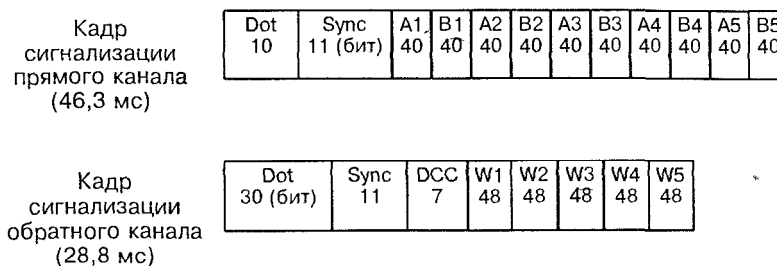


Рис.2.13. Структура кадров сигнализации выделенных каналов управления системы D-AMPS:

Dot – пунктир (Dotting) – последовательность чередующихся единиц и нулей (дает хорошо обнаруживаемую частотную составляющую 5 кГц); Sync – синхронизирующая последовательность, DCC – цифровой код цвета (Digital Color Code), A1...A5 – информационные слова для подвижных станций с четными номерами, B1...B5 – информационные слова для подвижных станций с нечетными номерами, W1...W5 – информационные слова.

В обоих случаях кадр начинается с пунктирной последовательности, означающей начало кадра, и синхронизирующей последовательности известной структуры. Затем следуют информационные слова, которые повторяются пятью разами для исключения слов с искажениями по мажоритарному принципу («3 из 5»). Для защиты от ошибок информационные слова дополнительно кодируются (код BCH): из 40 бит слова прямого канала – 28 бит информационных и 12 контрольных; из 48 бит слова обратного канала – 36 информационных и 12 контрольных. В прямом канале информация передается синхронно (с жесткой привязкой ко времени), в обратном – асинхронно. Информационные поля кадра прямого канала содержат также так называемые биты «занято/свободно» – Busy/Idle (B/I) bits, по одному – в полях пунктира и синхронизации и по четыре – в каждом информационном слове; этими битами определяется временная привязка кадров сигнализации обратного канала (т.е. данная подвижная станция выдает свою информацию тогда, когда по состоянию бита «занято/свободно», канал не занят информацией, передаваемой другой подвижной станцией). Передаваемое сообщение может занимать более одного кадра.

В стандарте IS-136 выделенных каналов управления нет, т.е. все частотные каналы равноправны в отношении состава передаваемой информации, но в явном виде возникает необходимость в использовании понятия логических каналов – каналов трафика и каналов управления. Каналы трафика, как мы уже упоминали, в стандарте IS-136 не претерпели изменений по сравнению с IS-54. На структуре вновь появившихся цифровых каналов управления мы остановимся несколько подробнее.

Логические каналы управления стандарта IS-136 перечислены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Логические каналы управления стандарта IS-136

Обратные каналы управления	RACH
Прямые каналы управления	BCCH: F-BCCH, E-BCCH, S-BCCH SPACH: PCH, ARCH, SMSCH SCF

Для передачи информации логических каналов управления выделяется один физический канал, т.е. два слота в пределах одного кадра эфирного интерфейса при полноскоростном кодировании, по одному слоту в пределах каждого из двух блоков (рис. 2.10).

В обратном направлении (от подвижной станции к базовой) передается информация только одного логического канала управления – канала случайного доступа RACH (Random Access Channel). Информация этого канала используется для организации доступа в систему сотовой связи со стороны подвижной станции и передается во всех слотах соответствующего физического канала.

В прямом направлении (от базовой станции к подвижной) передается информация нескольких логических каналов управления:

- вещательного канала управления BCCH (Broadcast Control Channel) с подканалами быстрого вещательного управления F-BCCH (Fast BCCH), расширенного вещательного управления E-BCCH (Extended BCCH) и вещательной передачи сообщений S-BCCH (Broadcast messaging);
- канала SPACH с подканалами вызова PCH (Paging Channel), ответа на вызов ARCH (Access Response Channel) и передачи коротких сообщений по определенному адресу SMSCH («от точки к точке» – point-to-point Short Message Service Channel);
- общего канала обратной связи SCF (Shared Channel Feedback).

Канал RACH (канал случайного доступа) используется при установлении связи по инициативе подвижной станции или, иными словами, для организации доступа в сеть со стороны подвижной станции. Канал SCF используется для передачи ответной информации в процессе организации этого доступа.

В канале BCCH передается информация, предназначенная для всех подвижных станций (*вещательный* режим передачи информации): это информация о состоянии сети (подканалы F-BCCH и E-BCCH), а также вещательные короткие сообщения (подканал S-BCCH). Быстро изменяющаяся информация о состоянии сети, требующая частого обновления (параметры каналов управления и информация, существенная для организации доступа в сеть), передается в подканале F-BCCH, вся информация которого обновляется с частотой суперкадров. Менее срочная информация, переда-

ется в подканале E-BCCH, передача одного сообщения в котором может растягиваться на несколько суперкадров.

Канал SPACH используется для передачи адресных сообщений, т.е. сообщений, адресованных конкретным подвижным станциям. В подканале PCN передается информация вызова, а также команды для подвижной станции. Подканал ARCH используется на завершающем этапе установления соединения подвижной станции с сетью. Подканал SMSCH предназначен для адресной передачи коротких сообщений.

Передача информации в прямых цифровых каналах управления организуется следующим образом. Информация канала SCF передается в соответствующем поле каждого слота канала управления (рис. 2.10). Информация остальных каналов размещается в полях Data и имеет определенную последовательность в пределах слотов суперкадра и гиперкадра. Всего в суперкадре при полном скоростном кодировании 32 слота канала управления. Первые слоты отводятся для подканала F-BCCH (от 3 до 10 слотов), следующие слоты – для E-BCCH (от 1 до 8 слотов), затем – для S-BCCH (от 0 до 16 слотов) и в конце – для информации канала SPACH (от 2 до 28 слотов). Информация подканалов F-BCCH и PCN одинакова в обоих суперкадрах одного гиперкадра (дублирование информации с целью повышения достоверности ее приема); информация других подканалов в суперкадрах одного гиперкадра различна.

Принятая структура каналов управления предусматривает такую организацию вызова подвижной станции, которая поддерживает режим засыпания (*sleep mode*) последней. Для этого вызов повторяется с периодичностью кадра вызова, а длительность кадра вызова в зависимости от его класса составляет от 1,28 секунды до 123 секунд. Если говорить более конкретно, то длительность кадра вызова для классов 1...8 составляет соответственно 1, 2, 3, 6, 12, 24, 48 и 96 гиперкадров, и в обоих суперкадрах первого гиперкадра в пределах кадра вызова передается информация вызова. Подвижная станция принимает (декодирует) информацию в первом (первичном) из двух указанных суперкадров, и если вызова в ее адрес нет, то «засыпает», т.е. отключается даже на прием до конца кадра вызова. Если декодировать информацию в первичном суперкадре не удастся, например из-за искажений сигналов, вызванных помехами, то предпринимается попытка декодировать вторичный суперкадр, несущий ту же информацию подканалов F-BCCH и PCN, после чего подвижная станция также получает возможность «заснуть» до конца кадра вызова. По умолчанию, т.е. до первой регистрации в системе, подвижная станция использует кадр вызова класса 1, т.е. кадр вызова минимальной длительности (один гиперкадр). В дальнейшем длительность кадра вызова назначается сетью.

Структура логических каналов стандарта GSM в упрощенном виде приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Упрощенная структура логических каналов стандарта GSM

Виды логических каналов	Типы каналов в пределах видов
Каналы трафика TCH	TCH/FS, TCH/HS
Каналы управления CCH	BCCH: FCCH, SCH CCCH: PCH, RACH, AGCH SDCCH ACCH: FACCH, SACCH

Логические каналы стандарта GSM делятся на каналы трафика и каналы управления.

Каналы трафика TCH (Traffic Channels), в свою очередь, делятся на полноскоростные TCH/FS (с полноскоростным кодированием; F – сокращение от Full – полный; S – Speech – речь) и полускоростные TCH/HS (H – сокращение от Half – половина); в обоих случаях имеется в виду передача речи. Типы каналов трафика для передачи данных в табл.2.3 не включены (TCH/F9.6, TCH/F4.8, TCH/H4.8 и т.п.).

Каналы управления CCH (Control Channels) делятся на 4 типа: вещательные каналы управления BCCH (Broadcast Control Channels), общие каналы управления CCCH (Common Control Channels), выделенные закрепленные каналы управления SDCCH (Standalone Dedicated Control Channels), совмещенные каналы управления ACCH (Associated Control Channels).

Вещательные каналы управления BCCH предназначены для передачи информации от базовой станции к подвижным в вещательном режиме, т.е. без адресования к какой-либо конкретной подвижной станции. В число вещательных каналов управления входят: канал коррекции частоты FCCH (Frequency Correction Channel) – для подстройки частоты подвижной станции под частоту базовой, канал синхронизации SCH (Synchronization Channel) – для кадровой синхронизации подвижных станций, а также канал общей информации, не имеющий отдельного наименования.

Общие каналы управления CCCH включают: канал вызова PCH (Paging Channel), используемый для вызова подвижной станции базовой; канал разрешения доступа AGCH (Access Grant Channel) – для назначения закрепленного канала управления, которое также передается от базовой станции на подвижную; канал случайного доступа RACH (Random Access Channel) – для выхода с подвижной станции на базовую с запросом о назначении выделенного канала управления. При передаче информации по общим каналам управления прием информации не сопровождается подтверждением.

Выделенные закрепленные каналы управления SDCCH (используются в двух вариантах, не отраженных в табл. 2.3) – автономные каналы управления для передачи информации с базовой станции на подвижную и в обратном направлении.



Рис.2.14. Структура мультикадра канала управления эфирного интерфейса системы GSM:
 R – канал RACH; F – канал FCCH; S – канал SCH; V – канал BCCH; C – канал AGCH/канал PCH; I – свободный кадр (Idle)

Совмещенные каналы управления ACCH, также используемые для передачи информации в обоих направлениях (от базовой станции к подвижным и от подвижных к базовой) и имеющие несколько вариантов, не отраженных в табл.2.3, включают: медленный совмещенный канал управления SACCH (Slow Associated Control Channel) – объединяется с каналом трафика (кадр 13 мультикадра канала трафика) или с каналом SDCCH; быстрый совмещенный канал управления FACCH (Fast Associated Control Channel) – совмещается с каналом трафика, заменяя в соответствующем слоте информацию речи, причем эта замена помечается скрытым флажком (поле S на рис.2.11).

В отличие от дуплексных каналов – трафика и совмещенных каналов управления, размещаемых в канале трафика эфирного интерфейса, – симплексные каналы управления BCCH и CCCH размещаются в нулевом слоте кадров канала управления эфирного интерфейса на так называемых несущих BCCH, имеющих в ячейке.

Сообщения канала RACH могут быть переданы в нулевом слоте любого кадра в пределах 51-кадрового мультикадра канала управления (рис.2.14). Сообщение RACH передается подвижной станцией раз в 235 мс, т.е. только в одном из кадров мультикадра, при этом используется структура слота, соответствующая пакете доступа.

Сообщения каналов BCCH и CCCH, передаваемые от базовой станции к подвижным (прямой канал), размещаются в нулевых слотах 50 кадров мультикадра канала управления эфирного интерфейса; последний, 51-й, кадр мультикадра остается свободным. Первые 50 кадров делятся на 5 блоков по 10 кадров: в начале каждого блока передается сообщение канала FCCH (структура слота – пачка коррекции частоты), далее – сообщение канала SCH (структура слота – пачка синхронизации), затем в первом блоке передается четыре сообщения канала BCCH и четыре сообщения канала AGCH или канала PCN, а в остальных четырех блоках все восемь сообщений отводятся под канал AGCH или PCN. Сообщения логических каналов управления в большинстве случаев кодируются со значительной избыточностью с целью защиты от ошибок при передаче информации.

И в заключение еще раз отметим, что изложенные сведения о структуре и организации работы логических каналов управления весьма схематичны и не претендуют на исчерпывающую полноту. Более того, такие сложные и ответственные разделы, как организация каналов управления, имеют тенденцию совершенствоваться со временем, так что детальное знакомство с их работой требует изучения новейших версий стандартов, содержащих последние изменения.

2.3.2. Инициализация и установление связи

Перейдем к рассмотрению организации основных режимов работы системы сотовой связи.

Центр коммутации и базовые станции работают круглосуточно и непрерывно, без выключений. При возникновении в них неисправностей работоспособность поддерживается за счет предусмотренного конструкцией резервирования, с ремонтом (заменой) вышедших из строя элементов в ситуации, когда они находятся в положении резервных. В работе подвижных станций перерывы и отключения практически неизбежны, в том числе – для смены источников питания.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай – работу подвижной станции в пределах одной ячейки своей («домашней») системы, без передачи обслуживания. В этом случае в работе подвижной станции можно выделить четыре этапа, которым соответствуют четыре режима работы:

- включение и инициализация;
- режим ожидания;
- режим установления связи (вызова);
- режим ведения связи (телефонного разговора).

После включения подвижной станции, т.е. после замыкания цепи питания, производится инициализация – начальный запуск. В течение этого этапа происходит настройка подвижной станции на работу в составе системы – по сигналам, регулярно передавае-

мым базовыми станциями по соответствующим каналам управления, после чего подвижная станция переходит в режим ожидания. Конкретное содержание этапа инициализации зависит от используемого стандарта сотовой связи.

В стандарте D-AMPS версии IS-54 подвижная станция начинает со сканирования выделенных каналов управления и выбора канала с наиболее сильным сигналом; затем по передаваемой в этом канале информации подвижная станция определяет номера каналов вызова, находит среди них канал с наиболее сильным сигналом, настраивается на его частоту и остается в режиме ожидания.^{*)} В версии IS-136 алгоритм настройки подвижной станции на цифровой канал управления более сложен и гибок, прежде всего в интересах скорейшего завершения процесса настройки. При этом рекомендуется в максимальной степени использовать всю имеющуюся информацию о положении канала управления (где находился канал управления в прошлом сеансе работы, указатель положения канала управления, если он имеется, и др.), а при прямом поиске со сканированием всех частотных каналов стандартом рекомендуется определенная последовательность сканирования групп каналов, в соответствии с вероятностью размещения в них цифровых каналов управления.

В стандарте GSM подвижная станция сканирует все имеющиеся частотные каналы, настраивается на канал с наиболее сильным сигналом и по наличию пачки коррекции частоты определяет, передается ли в этом частотном канале информация канала BCCH. Если нет, то станция перестраивается на следующий по уровню сигнала частотный канал, и так до тех пор, пока не будет найден канал BCCH. Затем подвижная станция находит пачку синхронизации, синхронизируется с выбранным частотным каналом, расшифровывает дополнительную информацию о базовой станции (в частности, 6-битовый код идентификации базовой станции) и принимает окончательное решение о продолжении поиска или о работе в данной ячейке.

Находясь в режиме ожидания, подвижная станция отслеживает:

- изменения информации системы – эти изменения могут быть связаны как с изменениями режима работы системы, так и с перемещениями самой подвижной станции, например с переходом ее в другую ячейку;

^{*)} Строго говоря, полная процедура инициализации, имеющая смысл при использовании двухрежимных (цифро-аналоговых) подвижных станций и при работе в полной полосе частот, отведенной для сотовой связи, сложнее. Сначала станция сканирует первичные выделенные каналы управления (в пределах полосы оператора А или В), настраивается на наиболее сильный канал и проверяет наличие возможности работы в цифровом режиме (по содержанию соответствующего бита сигнальной информации). Если такая возможность есть, станция остается в режиме ожидания в цифровом режиме на этом канале; если нет, то сканирует вторичные выделенные каналы управления, и т.д. В соответствии с изложенными ранее соображениями мы не описываем эту процедуру, как и практически все последующие, с такой степенью подробности.

- команды системы – например, команду подтвердить свою работоспособность («регистрация» в конкретной ячейке);
- получение вызова со стороны системы;
- инициализацию вызова со стороны собственного абонента.

Две последние ситуации – получение или инициализацию вызова – мы рассмотрим подробнее несколько ниже.

Кроме того, подвижная станция может периодически, например раз в 10...15 минут, подтверждать свою работоспособность, передавая соответствующие сигналы на базовую станцию (подтверждение «регистрации» или уточнение местоположения). В центре коммутации для каждой из включенных подвижных станций фиксируется ячейка, в которой она «зарегистрирована», что облегчает организацию процедуры вызова подвижного абонента. Если подвижная станция не подтверждает свою работоспособность в течение определенного промежутка времени, например пропускает два или три подтверждения «регистрации» подряд, центр коммутации считает ее выключенной, и поступающий на ее номер вызов не передается.

В стандарте GSM подвижная станция измеряет и периодически передает на базовую станцию следующие параметры:

- уровень сигнала базовой станции рабочей («своей») ячейки и до 16 смежных ячеек, измеряемый по сигналу канала BCCH;
- код качества принимаемого сигнала в рабочей ячейке – функцию оценки частоты битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) по принятому сигналу перед каналным декодированием.

В стандарте D-AMPS измерения уровня сигнала и частоты битовой ошибки выполняются по команде с базовой станции для обеспечения процедуры передачи обслуживания.

Рассмотрим процедуру установления связи.

Если со стороны системы поступает вызов номера подвижного абонента, центр коммутации направляет этот вызов на базовую станцию той ячейки, в которой «зарегистрирована» подвижная станция, или на несколько базовых станций в окрестности этой ячейки – с учетом возможного перемещения абонента за время, прошедшее с момента последней «регистрации», а базовые станции передают его по соответствующим каналам вызова. Подвижная станция, находящаяся в режиме ожидания, получает вызов и отвечает на него через свою базовую станцию, передавая одновременно данные, необходимые для проведения процедуры аутентификации; последняя, как представляющая самостоятельный интерес, будет рассмотрена подробнее в разд. 2.3.3. При положительном результате аутентификации назначается канал трафика, и подвижной станции сообщается номер соответствующего частотного канала. Подвижная станция настраивается на выделенный канал и совместно с базовой станцией выполняет необходимые шаги по подготовке сеанса связи. На этом этапе подвижная станция настраивается на заданный номер слота в кадре, уточняет задержку во времени, подстраивает уровень излучаемой мощности и т.п.

Выбор временной задержки производится с целью временного согласования слотов в кадре (на прием в базовой станции) при организации связи с подвижными станциями, находящимися на разных расстояниях от базовой. При этом временная задержка передаваемой подвижной станцией пачки регулируется по командам базовой станции. В стандарте D-AMPS при выборе временной задержки работа осуществляется укороченными пачками. Исходное значение задержки составляет 88 бит; оно может уменьшаться на величину до 30 бит с шагом 1 бит (20,55 мкс). В стандарте GSM при выборе задержки используются пачки доступа. Задержка регулируется в пределах от 0 до 63 бит с дискретом 1 бит (3,69 мкс). В дальнейшем базовая станция отслеживает изменение дальности до подвижной станции и корректирует величину задержки, выдавая соответствующие команды на подвижную станцию. При малых геометрических размерах ячейки, т.е. при малых величинах задержки (в пределах защитного бланка или защитного интервала), компенсация временной задержки может не производиться.

В стандарте GSM производятся также привязка подвижной станции к базовой по частоте с использованием пачки коррекции частоты и временная синхронизация подвижной станции с базовой с точностью до 1/4 бита, для чего в пачке синхронизации передаются номера четверти бита (QN – Quarter bit Number, в пределах от 0 до 624), бита (BN – Bit Number, в пределах от 0 до 156), слота (TN – Timeslot Number, в пределах от 0 до 7) и кадра (FN – Frame Number, в пределах от 0 до 2715648); одновременно в пачке синхронизации передаются 3-битовый код (код цвета – colour code) сети сотовой связи и 3-битовый код базовой станции, составляющие в совокупности уникальный 6-битовый идентификатор базовой станции (BSIC – Base Station Identifier Code).

Затем базовая станция выдает сообщение о подаче сигнала вызова (звонка), которое подтверждается подвижной станцией, и вызывающий абонент получает возможность услышать сигнал вызова. Когда вызываемый абонент отвечает на вызов («снимает трубку», т.е. нажимает соответствующую кнопку на панели управления абонентского аппарата), подвижная станция выдает запрос на завершение соединения. С завершением соединения начинается собственно сеанс связи – абоненты ведут разговор.

В процессе разговора подвижная станция производит обработку передаваемых и принимаемых сигналов речи, а также передаваемых одновременно с речью сигналов управления. По окончании разговора происходит обмен служебными сообщениями между подвижной и базовой станцией (запрос или команда на отключение с подтверждением), после чего передатчик подвижной станции выключается и станция переходит в режим ожидания.

Если вызов инициируется со стороны подвижной станции, т.е. абонент набирает номер вызываемого абонента, убеждается в правильности набора по отображению на дисплее и нажимает соответствующую кнопку («вызов») на панели управления, то подвижная станция передает через свою базовую станцию сообщение с

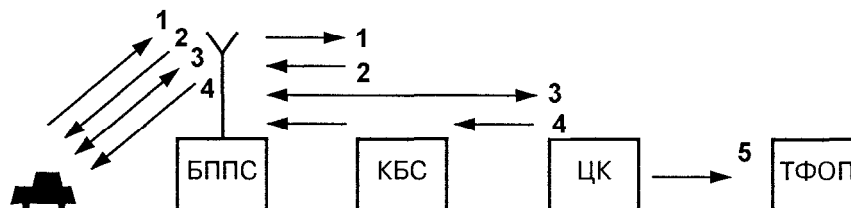


Рис.2.15. Упрощенная схема установления связи

(исходящий вызов; стандарт GSM):

БПРС – базовая приемно-передающая станция; КБС – контроллер базовой станции; ЦК – центр коммутации; ТФОП – стационарная телефонная сеть общего пользования

указанием вызываемого номера и данными для аутентификации подвижного абонента. После аутентификации базовая станция назначает канал трафика, и последующие шаги по подготовке сеанса связи производятся таким же образом, как и при поступлении вызова со стороны системы.

Затем базовая станция сообщает на центр коммутации о готовности подвижной станции, центр коммутации передает вызов в сеть, а абонент подвижной станции получает возможность следить за ходом его выполнения (слышит сигналы «вызов» или «занято»). Соединение завершается на стороне сети.

Описанная процедура схематически иллюстрируется на рис. 2.15. Цифрами обозначена такая последовательность действий:

1. Подвижная станция через канал случайного доступа (RACH) запрашивает выделенный закрепленный канал управления (SDCCH) для установления связи.
2. Контроллер базовой станции через канал разрешения доступа (AGCH) назначает канал SDCCH.
3. Подвижная станция через канал SDCCH проводит аутентификацию и выдает запрос на вызов (с номером вызываемого абонента).
4. Центр коммутации выдает команду на назначение канала трафика (TCH).
5. Центр коммутации выдает вызываемый номер на стационарную телефонную сеть, и после ответа вызываемого абонента завершает соединение.

Процесс разговора и завершение сеанса связи не отличаются от предыдущего случая.

Если подвижный абонент разговаривает с другим подвижным абонентом, то процедура установления связи и проведения сеанса связи происходит практически таким же образом. Если при этом оба подвижных абонента относятся к одной и той же сотовой системе, то связь между ними устанавливается через центр ком-

мутации системы без выхода в стационарную телефонную сеть. Такова общая схема организации процесса связи в сотовой системе. Многие детали в ней опущены, но к некоторым из них мы еще вернемся по ходу дальнейшего изложения.

2.3.3. Аутентификация и идентификация

Рассмотрим процедуры аутентификации и идентификации, которые выполняются при каждом установлении связи. О первой из них мы уже упоминали ранее.

Аутентификация – процедура подтверждения подлинности (действительности, законности, наличия прав на пользование услугами сотовой связи) абонента системы подвижной связи. Необходимость введения этой процедуры вызвана неизбежным соблазном получения несанкционированного доступа к услугам сотовой связи, приводящим к многочисленным и разнообразным проявлениям особого рода мошенничества – фрода в сотовой связи, о котором мы расскажем подробнее в разделе 3.5. Слово *аутентификация* (английское *authentication*) происходит от греческого *authentikos* – подлинный, исходящий из первоисточника. В русском языке довольно часто используется родственный юридический термин – *аутентичные тексты*, например тексты договора на нескольких языках, имеющие равную силу.

Идентификация – процедура отождествления подвижной станции (абонентского радиотелефонного аппарата), т.е. процедура установления принадлежности к одной из групп, обладающих определенными свойствами или признаками. Эта процедура используется для выявления утерянных, украденных или неисправных аппаратов. Слово *идентификация* (английское *identification*) происходит от средневекового латинского *identificare* – отождествлять.

Первоначально, в аналоговых системах сотовой связи первого поколения, процедура аутентификации имела простейший вид: подвижная станция передавала свой уникальный идентификатор (электронный серийный номер – Electronic Serial Number, ESN), и если таковой отыскивался среди зарегистрированных в домашнем регистре, то процедура аутентификации считалась успешно выполненной. Столь примитивная аутентификация оставляла большие возможности для фрода, поэтому со временем и в аналоговых системах, и тем более в системах сотовой связи второго поколения с использованием дополнительных возможностей цифровых методов передачи информации процедура аутентификации была значительно усовершенствована.

Идея процедуры аутентификации в цифровой системе сотовой связи заключается в шифровании некоторых паролей-идентификаторов с использованием квазислучайных чисел, периодически передаваемых на подвижную станцию с центра коммутации, и индивидуального для каждой подвижной станции алгоритма шифрования. Такое шифрование, с использованием одних и тех же ис-

ходных данных и алгоритмов, производится как на подвижной станции, так и в центре коммутации (или в центре аутентификации), и аутентификация считается закончившейся успешно, если оба результата совпадают.

В стандарте GSM процедура аутентификации связана с использованием модуля идентификации абонента (Subscriber Identity Module – SIM), называемого также SIM-картой (SIM-card) или смарт-картой (smart-card), о котором мы расскажем чуть подробнее, поскольку до сих пор такого повода нам не предоставлялось. Модуль SIM – это съемный модуль, напоминающий по внешнему виду пластиковую кредитную карточку и вставляемый в соответствующее гнездо абонентского аппарата. Модуль вручается абоненту одновременно с аппаратом и в принципе позволяет вести разговор с любого аппарата того же стандарта, в том числе с таксофонного. Модуль содержит персональный идентификационный номер абонента (Personal Identification Number – PIN), международный идентификатор абонента подвижной связи (International Mobile Subscriber Identity – IMSI), индивидуальный ключ аутентификации абонента Ki, индивидуальный алгоритм аутентификации абонента A3, алгоритм вычисления ключа шифрования A8. Для аутентификации используется зашифрованный отклик (signed response) S, являющийся результатом применения алгоритма A3 к ключу Ki и квазислучайному числу R, получаемому подвижной станцией от центра аутентификации через центр коммутации. Алгоритм A8 используется для вычисления ключа шифрования сообщений. Уникальный идентификатор IMSI для текущей работы заменяется временным идентификатором TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity – временный идентификатор абонента подвижной связи), присваиваемым аппарату при его первой регистрации в конкретном регионе, определяемом идентификатором LAI (Location Area Identity – идентификатор области местоположения), и сбрасываемым при выходе аппарата за пределы этого региона. Идентификатор PIN – код, известный только абоненту, который должен служить защитой от несанкционированного использования SIM-карты, например при ее утере. После трех неудачных попыток набора PIN-кода SIM-карта блокируется, и блокировка может быть снята либо набором дополнительного кода – персонального кода разблокировки (Personal unblocking key – PUK), либо по команде с центра коммутации.

Процедура аутентификации стандарта GSM схематически показана на рис. 2.16. Пунктиром отмечены элементы, не относящиеся непосредственно к процедуре аутентификации, но используемые для вычисления ключа шифрования Kc. Вычисление производится каждый раз при проведении аутентификации.

Процедура идентификации заключается в сравнении идентификатора абонентского аппарата с номерами, содержащимися в соответствующих «черных списках» регистра аппаратуры, с целью изъятия из обращения украденных и технически неисправных аппаратов. Идентификатор аппарата делается таким, чтобы его из-

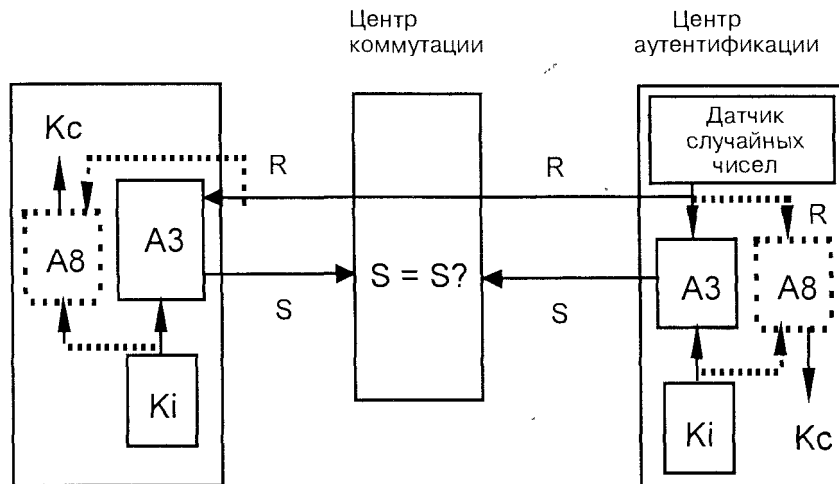


Рис.2.16. Схема процедуры аутентификации (стандарт GSM):
 R - случайное число; A3 - алгоритм аутентификации; A8 - алгоритм вычисления ключа шифрования; Ki - ключ аутентификации, Kc - ключ шифрования; S - зашифрованный отклик (Signed Response - SRES)

менение или подделка были трудными и экономически невыгодными. В принципе может быть целесообразен и оперативный обмен информацией между регистрами аппаратуры – межоператорский и международный, в интересах объединения усилий операторов в борьбе с фродом в сотовой связи.

2.3.4. Передача обслуживания

Как мы уже рассказывали ранее, базовая станция, находящаяся примерно в центре ячейки, обслуживает все подвижные станции в пределах своей ячейки. При перемещении подвижной станции из одной ячейки в другую ее обслуживание соответственно передается от базовой станции первой ячейки к базовой станции второй (рис. 2.17). Этот процесс называется *передачей обслуживания* (американский термин *handoff*, англоевропейский – *handover*). Подчеркнем, что процедура передачи обслуживания имеет место только в том случае, когда подвижная станция пересекает границу ячеек во время сеанса связи, и связь (телефонный разговор) при этом не прерывается. Если же подвижная станция перемещается из одной ячейки в другую, находясь в режиме ожидания, она просто отслеживает эти перемещения по информации системы, передаваемой по каналам управления, и в нужный мо-

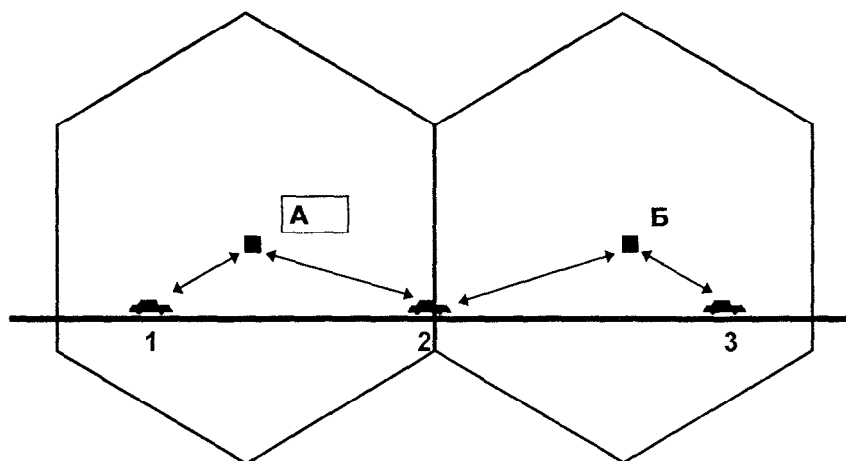


Рис 2.17 Передача обслуживания из ячейки А в ячейку Б при пересечении подвижной станцией границы ячеек

мент перестраивается на более сильный сигнал другой базовой станции

Технически процедура передачи обслуживания осуществляется следующим образом. Необходимость в передаче обслуживания возникает, когда качество канала связи, оцениваемое по уровню сигнала и/или частоте битовой ошибки, падает ниже допустимого предела. В стандарте GSM указанные параметры постоянно измеряются подвижной станцией как для своей ячейки, так и для ряда смежных (до 16 ячеек), и результаты измерений передаются на базовую станцию. В стандарте D-AMPS подвижная станция измеряет эти характеристики только для рабочей ячейки, но при ухудшении качества связи она сообщает об этом через базовую станцию на центр коммутации, и по команде последнего аналогичные измерения выполняются подвижными станциями в соседних ячейках. По результатам этих измерений центр коммутации выбирает ячейку, в которую должно быть передано обслуживание. Обратим внимание, что организация передачи обслуживания основывается на измерениях, выполняемых на подвижных станциях – во временных слотах, свободных от передачи и приема информации; кроме того, могут использоваться и результаты измерений, выполняемых на базовых станциях. Это отражается в английском наименовании процедуры – Mobile-Assisted HandOff (HandOver) – MAHO, т.е. передача обслуживания при использовании помощи самой подвижной станции. Тем самым подчеркивается отличие от процедуры передачи обслуживания в аналоговых сотовых системах, где аналогичные измерения выполнялись только на базовых станциях.

Обязательным условием передачи обслуживания из одной ячейки в другую является более высокое качество канала связи во второй ячейке по сравнению с первой. Иначе говоря, обслуживание передается из ячейки с худшим качеством канала связи в ячейку с лучшим качеством, причем указанное различие должно быть не менее некоторой наперед заданной величины. Если не требовать выполнения этого условия, а передавать обслуживание, например, уже при одинаковом качестве канала связи в двух ячейках, то в некоторых случаях, в частности, при перемещении подвижной станции примерно вдоль границы ячеек, возможна многократная передача обслуживания из первой ячейки во вторую и обратно, приводящая к значительной загрузке системы бессмысленной работой и к снижению качества связи.

Приняв решение о передаче обслуживания и выбрав новую ячейку, центр коммутации сообщает об этом базовой станции новой ячейки, а подвижной станции через базовую станцию старой ячейки выдает необходимые команды с указанием нового частотного канала, номера рабочего слота и т.п. Подвижная станция перестраивается на новый канал и настраивается на совместную работу с новой базовой станцией, выполняя примерно те же шаги, что и при подготовке сеанса связи, после чего связь продолжается через базовую станцию новой ячейки.

При этом перерыв в телефонном разговоре не превышает долей секунды и остается незаметным для абонента.

2.3.5. Роминг

В настоящем разделе мы рассмотрим функцию роминга – еще одну функцию системы сотовой связи, позволяющую расширить возможности пользования сотовой связью за пределы одной («домашней») системы.

Роминг – это функция, или процедура предоставления услуг сотовой связи абоненту одного оператора в системе другого оператора. Термин *роминг* происходит от английского *roam* – бродить, странствовать, а абонента, использующего услуги роминга, называют *ромером* (английское *roamer*). Для реализации роминга необходимо техническое обеспечение его осуществимости (в простейшем случае – использование в обеих системах одного и того же стандарта сотовой связи) и наличие ромингового соглашения между соответствующими компаниями-операторами. По мере развития мобильной связи понятие роминга заметно расширяется; например, появляется возможность роминга между системами сотовой и мобильной спутниковой связи.

Идеализированная и сильно упрощенная схема организации роминга могла бы быть представлена в следующем виде. Абонент сотовой связи, оказавшийся на территории «чужой» системы, допускающей реализацию роминга, инициирует вызов обычным образом, как если бы он находился на территории «своей» системы.

Центр коммутации, убедившись, что в его домашнем регистре этот абонент не значится, воспринимает его как ромера и заносит в гостевой регистр. Одновременно (или с некоторой задержкой) он запрашивает в домашнем регистре «родной» системы ромера относящиеся к нему сведения, необходимые для организации обслуживания (оговоренные подпиской виды услуг, пароли, шифры), и сообщает, в какой системе ромер находится в настоящее время; последняя информация фиксируется в домашнем регистре «родной» системы ромера. После этого ромер пользуется сотовой связью, как дома: исходящие от него вызовы обслуживаются обычным образом, с той только разницей, что относящиеся к нему сведения фиксируются не в домашнем регистре, а в гостевом; поступающие на его номер вызовы переадресуются «домашней» системой на ту систему, где ромер гостит. По возвращении ромера домой в домашнем регистре «родной» системы стирается адрес той системы, где ромер находился, а в гостевом регистре той системы, в свою очередь, стираются сведения о ромере. Оплата услуг роминга производится абонентом через «домашнюю» систему, а «домашняя» компания-оператор возмещает расходы компании-оператора, оказавшей услуги роминга, в соответствии с роминговым соглашением.

Описанная схема соответствует автоматическому ромингу. Для завершения процесса она должна быть еще дополнена автоматической системой ведения расчетов между компаниями-операторами, которая может оказаться весьма непростой – с учетом возникновения перекрестных обязательств между рядом компаний, а также возможности учета (погашения) взаимных обязательств пар компаний, входящих в группу, охватываемую системой автоматического роминга. Противоположностью автоматическому является ручной, или административный, роминг, в некоторых стандартах предшествовавший появлению автоматического. В случае ручного роминга абонент предупреждает, например, телефонным звонком, «домашнюю» компанию-оператора о предстоящем убытии, а по приезде в другой город – местную компанию-оператора о своем прибытии. Необходимые данные вносятся в домашний и гостевой регистры вручную операторами соответствующих центров коммутации. Существовали и промежуточные варианты: с отдельной процедурой регистрации (автоматической) нового ромера; с автоматической организацией вызова со стороны ромера, но с ручной маршрутизацией при вызове ромера со стороны сети и др.

Картина организации роминга была бы неполной, если бы мы не упомянули некоторых моментов истории, а также ряда дополнительных проблем, сопутствующих ромингу. При появлении сотовой связи ни проблемы, ни даже понятия роминга не было – столь большой успех и широкое распространение сотовой связи предсказать было невозможно. Поэтому роминг появлялся по мере развития сотовых систем и использовал в разных стандартах, странах и регионах различные технические и организационные решения. Заметное развитие роминг получил в аналоговых стандар-

тах AMPS (Северная Америка) и NMT (Скандинавия), но появление цифровых стандартов потребовало пересмотра многих из использовавшихся там решений. Решение задачи роamingа в цифровом стандарте D-AMPS опирается на отдельный стандарт IS-41, определяющий межсистемные операции. Более выгодное положение в этом отношении у стандарта GSM, который с самого начала разрабатывался как общеевропейский и в который процедура роamingа заложена как обязательный элемент. Кроме того, в стандарте GSM имеется возможность так называемого *роamingа с SIM-картами*, или *пластикового роamingа*, с перестановкой SIM-карт между аппаратами различных вариантов стандарта GSM (GSM 900, GSM 1800 и GSM 1900), поскольку во всех трех вариантах стандарта GSM используются унифицированные SIM-карты. Процедура роamingа в стандарте GSM становится еще более удобной с появлением двухрежимных, а в дальнейшем – и трехрежимных абонентских терминалов (GSM 900/GSM 1800/GSM 1900). Но и стандарт GSM пока не развернут полностью, в частности в отношении реализации всех принципиально заложенных в него технических решений. Из технических и организационных трудностей, связанных с развитием роamingа, отметим следующие: аутентификация абонентов с учетом неизбежного, инициативного и даже агрессивного фрода; организация оплаты услуг роamingа, существенно усложняющаяся с ростом масштабов и расширением географии роamingа; протекционизм (например, в некоторых странах запрещается применение абонентских аппаратов иностранного производства).

В заключение отметим, что при огромном росте межрегиональных и международных связей и делового общения организация полноценного автоматического роamingа в сотовой связи является одной из актуальных проблем и в ее решении остаются моменты, требующие дополнительной работы.

2.3.6. Функции сотовой связи

Рассмотрение вопросов организации работы завершим краткими сведениями о наборе функций, предлагаемых сотовой связью своим клиентам. Помимо обычной двусторонней радиотелефонной связи (передача речи) с подвижными абонентами сотовой сети и неподвижными абонентами стационарной телефонной сети, включая междугородную и международную телефонную связь, системы сотовой связи могут предложить абонентам еще целый ряд услуг, в том числе передачу факсимильных сообщений и компьютерных данных, переадресацию вызова и автодозвон, автоматическую регистрацию продолжительности телефонных разговоров, голосовую почту и многое другое. Несколько более подробно характеристику этих услуг в их «пользовательском» представлении мы дадим в разделе 3, а здесь ограничимся более «техническим» представлением на примере стандарта GSM.

Стандарт GSM дает четкую классификацию поддерживаемых им функций⁷⁾. Мы перечислим предусматриваемые этой классификацией функции, а затем приведем некоторые дополнительные пояснения.

Функции сотовой связи состоят из основных и дополнительных функций. Первые из них могут существовать сами по себе, они разделяются на два больших класса – *функции передачи (bearer services)* и *телефункции (teleservices)*. *Дополнительные функции (supplementary services)* могут предоставляться только одновременно с основными.

Функции передачи включают четыре категории:

1. Асинхронный обмен данными с коммутируемыми телефонными сетями общего пользования со скоростями 300...9600 бит/с.
2. Синхронный обмен данными с коммутируемыми телефонными сетями общего пользования, коммутируемыми сетями передачи данных общего пользования и цифровыми сетями с интеграцией функций со скоростями 300...9600 бит/с.
3. Асинхронный пакетный обмен данными с сетью передачи данных общего пользования с пакетной коммутацией (доступ через ассемблер/дисассемблер) со скоростями 300...9600 бит/с.
4. Синхронный пакетный обмен данными с сетью передачи данных общего пользования с пакетной коммутацией со скоростями 2400...9600 бит/с.

Функции передачи могут быть *прозрачными (transparent)* и *непрозрачными*. В прозрачных функциях передачи защита от ошибок обеспечивается только за счет текущей коррекции ошибок (коррекции ошибок на проходе – forward error correction). В непрозрачных функциях передачи предусматривается дополнительная защита в виде автоматического перезапроса (Automatic Repeat Request – ARQ).

Телефункции включают следующие категории.

1. Передача информации речи и тональной сигнализации в полосе речи.
2. Передача коротких сообщений (буквенно-цифровые сообщения – до 180 символов – в сторону подвижного абонента).
3. Доступ к системе обработки сообщений (например, передача сообщения от системы персонального радиовызова на подвижную станцию сотовой связи).
4. Передача факсимильных сообщений.

Дополнительные функции включают категории:

1. Идентификация и отображение вызывающего или подключенного номера и ограничение идентификации и отображения вызывающего или подключенного номера (вызывающей

⁷⁾ответствующий англоязычный термин services часто переводится как службы, что представляется нам не совсем удачным. В техническом контексте мы переводим его как функции, а в коммерческом – как услуги.

- стороне предоставляется право ограничить возможность идентификации ее номера).
2. Переадресация вызова на другой номер (безусловная переадресация и переадресация в случаях, когда абонент занят или не отвечает) и передача вызова (переключение установленной линии связи на другого абонента).
 3. Ожидание вызова (при занятом терминале абонент получает извещение о поступившем вызове и может ответить на него, отказаться от приема вызова или проигнорировать его поступление) и сохранение вызова (абонент имеет возможность прервать проводимый сеанс связи, ответив на другой вызов или сделав другой вызов, а затем вернуться к продолжению прерванного разговора).
 4. Конференц-связь – одновременный разговор трех или более абонентов.
 5. Закрытая группа пользователей – эта функция позволяет группе пользователей общаться только между собой; при необходимости один или более членов группы могут иметь доступ по входу/выходу к абонентам, не входящим в группу.
 6. Оперативная информация о стоимости оказываемых или оказанных услуг («совет об оплате»).
 7. Запрет на определенные функции, например на входящие вызовы, на международные вызовы или на исходящие вызовы для ромеров.
 8. Предоставление открытой линии связи сеть/пользователь для реализации функций, определяемых оператором

Перейдем к дополнительным пояснениям. Прежде всего поясним термины *функция передачи* и *телефункция*. Оба эти термина заимствованы из техники цифровых сетей с интеграцией функций (Integrated Services Digital Networks – ISDN) и соответствуют функциям, относящимся к разным точкам доступа (рис.2.18). Функция передачи (т.е. переноса данных) ориентирована только на транспортировку информации между соответствующими стыками пользователь/сеть, и в отличие от телефункции забота о совместимости протоколов связи оконечных устройств (терминальной аппаратуры) остается за пользователями этих устройств. Телефункция ориентирована на непосредственную связь пользователь/пользователь и включает функцию связи оконечных устройств.

В соответствии с изложенным возможны различные варианты конфигурации подвижной станции системы GSM, обеспечивающие различные точки доступа (рис. 2.19). В общем случае подвижная станция состоит из терминала системы подвижной связи (Mobile Termination – MT) и терминальной аппаратуры (Terminal Equipment – TE). Терминалы могут быть трех типов:

- МТ0 – функционально законченная подвижная станция, включающая как сетевой терминал, так и терминальную аппаратуру; именно такую подвижную станцию мы рассмотрим в разд. 2.2.2;

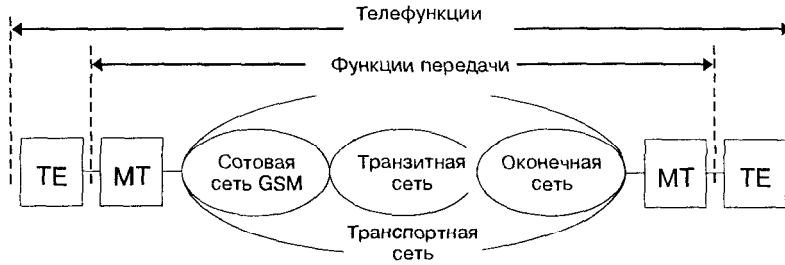


Рис.2.18. Функциям передачи и телефункциям соответствуют разные точки доступа:

MT – терминал системы подвижной связи (Mobile Termination);
TE – терминальная аппаратура (Terminal Equipment)

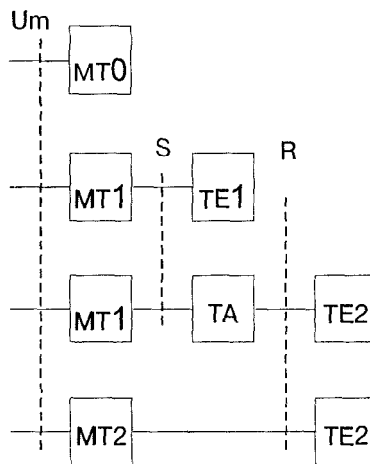


Рис.2.19. Точки доступа в сотовой сети стандарта GSM (четыре варианта конфигурации подвижной станции):

MT – терминал системы подвижной связи (Mobile Termination);
TE – терминальная аппаратура (Terminal Equipment);
TA – терминальный адаптер (Terminal Adapter)

- MT1 – поддерживает терминальную аппаратуру типа TE1 с интерфейсом ISDN;
- MT2 – поддерживает терминальную аппаратуру типа TE2 с интерфейсами серий X и V МККТТ; терминальная аппаратура типа TE2 может быть подключена также к терминалу MT1 через терминальный адаптер ТА.

Точки доступа S и R (обозначения ISDN) соответствуют функциям передачи, выходы терминала MTO и терминальной аппаратуры – телефонным функциям.

2.4. Оптимизация использования частотного диапазона и обработка сигналов

2.4.1. Полосы частот сотовой связи

Раздел 2.4 мы посвящаем вопросам рационального использования частотного диапазона и тесно связанным с ними вопросам обработки сигналов в сотовой связи.

Характерные полосы частот, используемые в сотовой связи, представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Характерные полосы частот, используемые в сотовой связи

Стандарт	Частоты, МГц		Длины волн, см	
	Обратный канал	Прямой канал	Обратный канал	Прямой канал
NMT-450	453... 457,5	463... 467,5	65,6...66,3	63,2...64,9
AMPS/D-AMPS	824... 849	869... 894	35,4...36,4	33,6...34,6
TACS/ETACS	890... 905	935... 950	33,2...33,8	31,6...32,1
GSM 900	890... 915	935... 960	32,8...33,7	31,2...32,1
PDC	810... 826	940... 956	36,3...37,0	31,4...31,9
	1429...1465	1477...1513	20,5...21,0	19,8...20,3
GSM 1800	1710...1785	1805...1880	16,8...17,6	16,0...16,6
GSM 1900	1850...1910	1930...1990	15,7...16,2	15,1...15,6

Первое, что наглядно видно из приведенной таблицы, – это жесткая ограниченность выделенных полос, вмещающих в общем-то весьма небольшое число частотных каналов. Отсюда возникает стремление к наиболее рациональному использованию имеющего-

ся диапазона, к оптимизации его использования и соответственно к повышению емкости системы связи. Этим вопросам посвящена значительная часть раздела: мы рассмотрим принцип повторного использования частот – основной принцип сотовой связи (разд. 2.4.2), различные методы множественного доступа (разд. 2.4.3), а также некоторые дополнительные возможности повышения емкости системы (разд. 2.4.3.5). Здесь же мы рассмотрим цифровые методы обработки сигналов (разд. 2.4.4), поскольку более совершенные методы множественного доступа требуют цифровой реализации. Вопросы оценки емкости системы мы рассмотрим в разд. 2.5.

Второе обстоятельство, следующее из данных табл. 2.4: используемые в сотовой связи полосы частот относятся к дециметровому диапазону. Как известно, дециметровые радиоволны распространяются в основном в пределах прямой видимости; дифракция на этих частотах выражена слабо, а молекулярного поглощения и поглощения в гидрометеорах (снег, дождь) практически нет. Однако близость подстилающей поверхности и наличие препятствий (зданий), особенно в условиях города, типичных для применения сотовой связи, приводит к появлению отраженных сигналов, интерферирующих между собой и с сигналом, прошедшим по прямому пути. Это явление называют *многолучевым* (или *многопутевым*) распространением сигналов.

Отражение от подстилающей поверхности при определенных условиях приводит к тому, что мощность принимаемого сигнала убывает пропорционально не второй степени расстояния между передатчиком и приемником, как при распространении в свободном пространстве, а пропорционально четвертой степени этого расстояния, т.е. напряженность поля убывает пропорционально квадрату расстояния («квадратичная» формула Введенского). Интерференция нескольких сигналов, прошедших различными путями, вызывает своеобразное явление *замираний* результирующего сигнала, или *Фэдинга* (английский термин *fading*), при котором интенсивность принимаемого сигнала изменяется в значительных пределах при перемещении подвижной станции. Кроме того, возникают искажения, являющиеся следствием наложения нескольких соизмеримых по интенсивности сигналов, смещенных один относительно другого во времени, которые могут приводить к ошибкам в принимаемой информации. Наконец, сложность картины многолучевого распространения существенно затрудняет расчет интенсивности сигналов в функции удаления от базовой станции, а такой расчет необходим для корректного проектирования системы. Поэтому практически при проектировании приходится использовать полуэмпирические модели распространения радиоволн, опирающиеся на конкретные результаты экспериментальных измерений. Эффекты многолучевого распространения и методы борьбы с ними мы рассмотрим подробнее в разд. 2.4.5, а с принципами проектирования систем сотовой связи познакомимся в разд. 2.6.

2.4.2. Принцип повторного использования частот

Повторное использование частот (английское *frequency reuse*) – это основной принцип системы сотовой связи, радикально отличающий ее от других, в частности – от транковых систем подвижной связи, и позволяющий существенно (теоретически – до бесконечности) повышать емкость системы. Идея повторного использования частот заключается в том, что в близких одна относительно другой ячейках системы используются разные полосы частот, а через несколько ячеек эти полосы повторяются, что выгодно уже само по себе, так как позволяет при ограниченной общей полосе частот охватить системой сколь угодно большую зону обслуживания. Это оказывается выгодно вдвойне, если учесть возможность повышения емкости системы за счет того или иного варианта дробления ячеек, к чему мы вернемся несколько ниже.

Рассмотрим пример. Пусть в некоторой ячейке **A** (рис.2.20) используется какая-то часть от полного диапазона частот, выделенного системе сотовой связи, например, для определенности, одна десятая. Тогда в соседней с ней ячейке **B** должна использоваться вторая десятая часть диапазона, поскольку вблизи общей границы в двух смежных ячейках нельзя использовать одни и те же частотные каналы. Из тех же соображений в ячейке **C** придется использовать третью десятую часть диапазона. Но уже в ячейке **D**, имеющей общие границы с ячейками **A** и **C**, но не граничащей с ячейкой **B**, вновь может быть использована та же десятая часть диапазона, что и в ячейке **B**, что условно обозначено **D**→**B**.

Аналогичные соображения справедливы для ячеек **E**, **F**, **G**, **H**, так что в итоге мы приходим к трехъячеечной схеме повторения частот, или к структуре системы, состоящей из 3-ячеечных (3-элементных) кластеров. Такая структура схематически представлена на рис. 2.21, причем одинаковыми цифрами обозначены ячейки, в которых используются одни и те же полосы частот. Очевидно, что 3-элементный кластер – это кластер минимально возможного размера; в каждой из его ячеек можно использовать не одну десятую, а одну треть от полного частотного диапазона, отведенного системе.

При 3-элементном кластере ячейки с одинаковыми полосами частот повторяются очень часто, что плохо в смысле уровня *соседних помех* (английское *cochannel interference*), т.е. помех от станций системы, работающих на тех же частотных каналах, но в других ячейках. В этом отношении более выгодны кластеры с большим числом элементов; примеры таких кластеров представлены на рис. 2.22 – 2.25.

Можно показать, что в общем случае расстояние D между центрами ячеек, в которых используются одинаковые полосы частот, связано с числом N ячеек в кластере простым соотношением

$$D = \sqrt{3NR},$$

или

$$q = D / R = \sqrt{3N},$$

где R – радиус ячейки (радиус окружности, описанной около правильного шестиугольника). Параметр q , определяемый последним равенством, называют *коэффициентом уменьшения соканальных помех* или *коэффициентом соканального повторения* (табл.2.5), а для величины $1/N$, обратной числу ячеек в кластере, иногда употребляют наименование *коэффициент эффективности повторного использования частот* или просто *коэффициент повторного использования частот*.

Таблица 2.5. Коэффициент уменьшения соканальных помех q в функции числа элементов в кластере N

N	$q = D/R$	Структура сети
3	3	Рис.2.21
4	3,46	Рис.2.22
7	4,58	Рис.2.23
12	6	Рис.2.24
19	7,55	Рис.2.25

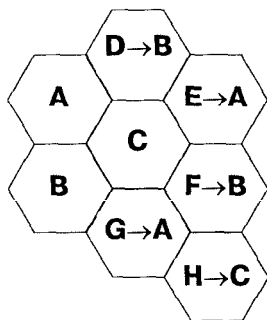


Рис.2.20. К построению трехэлементного кластера

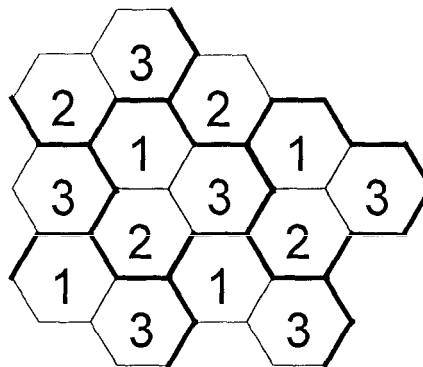


Рис.2.21. 3-элементный кластер

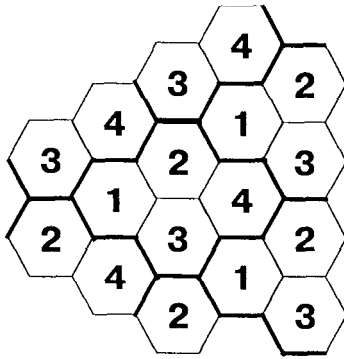


Рис.2.22. 4-элементный кластер

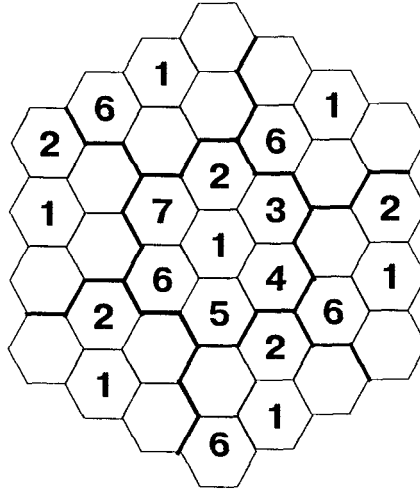


Рис.2.23. 7-элементный кластер

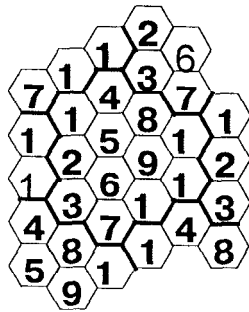


Рис.2.24. 12-элементный кластер

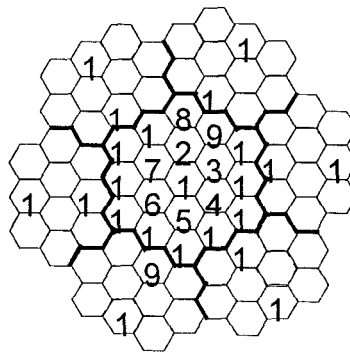


Рис.2.25. 19-элементный кластер

Заметим, что увеличение числа элементов в кластере, выгодное в отношении снижения уровня соканальных помех, приводит к пропорциональному уменьшению полосы частот, которая может быть использована в одной ячейке. Поэтому практически число элементов в кластере должно выбираться минимально возможным, обеспечивающим допустимое отношение сигнал/помеха.

Все изложенное, однако, не более чем схема, поясняющая идею принципа повторного использования частот, но не отражающая всех сложностей реальной жизни. Действительно, мы молчаливо предполагали, что на базовых станциях, расположенных в центрах ячеек, используются *всенаправленные антенны* (английское *omnidirectional antennas*, или просто *omni*). На самом деле часто используются направленные (в горизонтальной плоскости) антенны с шириной диаграммы направленности 120° или 60° , т.е. шестиугольная ячейка разбивается на 3 или 6 секторов, в каждом из которых естественно использовать свою полосу частот. Возможны и другие варианты дробления ячеек, причем этот прием широко используется для участков сети с напряженным трафиком в интересах обеспечения необходимой емкости системы. К способам повышения емкости системы сотовой связи мы вернемся в разд. 2.4.3.5. В целом же вопросы выбора конфигурации сети, определения конкретных размеров и расположения ячеек, распределения частот с учетом требований трафика и условий местности относятся к очень своеобразной и непростой области проектирования систем сотовой связи, понятие о которой мы дадим в разд. 2.6.

2.4.3. Методы множественного доступа

2.4.3.1. Варианты множественного доступа

Понятие *множественного доступа* (английский эквивалент *multiple access*) связано с организацией совместного использования ограниченного участка спектра многими пользователями. В ортодоксальных подходах выделяется пять вариантов множественного доступа:

1. Множественный доступ с частотным разделением каналов связи.
2. Множественный доступ с временным разделением каналов связи.
3. Множественный доступ с кодовым разделением каналов связи.
4. Множественный доступ с пространственным разделением каналов связи.
5. Множественный доступ с поляризационным разделением каналов связи.

Практический интерес для сотовой связи представляют первые три из них, поэтому в следующих разделах мы рассмотрим их подробнее. Четвертый метод фактически используется в реализации принципа повторного использования частот, в частности при делении ячейки на сектора с использованием направленных антенн, но обычно этот прием не преподносится как один из методов множественного доступа. Случаев практического применения поляризационного разделения нам не известно.

2.4.3.2. Множественный доступ с частотным разделением

Множественный доступ с частотным разделением (английское FDMA – Frequency Division Multiple Access), или множественный доступ с разделением каналов связи по частоте, – наиболее простой из трех методов множественного доступа как по своей идее, так и по возможности реализации. В этом методе каждому пользователю на время сеанса связи выделяется своя полоса частот Δf (частотный канал), которой он владеет безраздельно (рис.2.26). Метод FDMA используется во всех аналоговых системах сотовой связи (системах первого поколения) – это единственный метод, который целесообразно использовать в аналоговых системах, при этом полоса Δf составляет 10...30 кГц. Основное слабое место FDMA – недостаточно эффективное использование полосы частот. Эта эффективность заметно повышается при переходе к более совершенному методу TDMA, что позволяет соответственно повысить емкость системы сотовой связи.

2.4.3.3. Множественный доступ с временным разделением

Множественный доступ с временным разделением (английское TDMA – Time Division Multiple Access), или множественный доступ с разделением каналов связи по времени, также достаточно прост по идее, но значительно сложнее в реализации, чем FDMA. Суть метода TDMA заключается в том, что каждый частотный канал разделяется во времени между несколькими пользователями, т.е. частотный канал по очереди предоставляется нескольким пользователям на определенные промежутки времени. Это соответствует уже упоминавшейся нами возможности реализации нескольких физических каналов в одном частотном (разд. 2.2.5, 2.3.1). В качестве примера на рис. 2.27 представлен случай, когда каждый частотный канал делится между тремя пользователями. Строго говоря, приведенная на рис. 2.27 схема соответствует не чистому методу TDMA, а сочетанию FDMA с TDMA, поскольку мы рассматриваем здесь случай не одного, а нескольких частотных каналов, каждый из которых делится во времени между несколькими пользователями. Однако именно такая схема находит практическое применение

в системах сотовой связи, и именно ее обычно называют схемой TDMA.

Практическая реализация метода TDMA требует преобразования сигналов в цифровую форму и характерного «сжатия» информации во времени; с тем, как это делается, мы познакомимся подробнее в разд. 2.4.4. Цифровая обработка сигналов и схема TDMA используются в стандартах сотовой связи второго поколения D-AMPS, GSM, PDC. Особенно нагляден в этом отношении стандарт D-AMPS: при сохранении той же полосы частотного канала $\Delta f = 30$ кГц, что и в аналоговом стандарте AMPS, число физических каналов в нем возрастает втрое и более чем втрое возрастает емкость системы; с вводом полускоростного кодирования этот коэффициент увеличится еще в два раза. Заметим попутно, что разделение во времени может использоваться и для реализации прямых и обратных каналов дуплексной связи в одной и той же полосе частот (английское TDD – Time Division Duplex). Такое техническое решение находит применение в беспроводном телефоне. В сотовой связи обычно используется дуплексное разделение по частоте (английское FDD – Frequency Division Duplex), т.е. прямые и обратные каналы занимают разные полосы частот, смещенные одна относительно другой.

Метод TDMA, однако, сам по себе не реализует всех потенциальных возможностей по эффективности использования спектра; дополнительные резервы открываются при использовании иерархических структур и адаптивного распределения каналов, речь о которых впереди (подразд. 2.4.3.5). Известное преимущество в этом отношении может иметь метод CDMA. Мы рассмотрим его в следующем подразделе, где приведем также дополнительные соображения о сопоставлении его с методом TDMA.

2.4.3.4. Множественный доступ с кодовым разделением

Множественный доступ с кодовым разделением (английское CDMA – Code Division Multiple Access) прост только на уровне феноменологического описания метода (рис. 2.28): в нем большая группа пользователей (например, от 30 до 50), одновременно использует общую относительно широкую полосу частот – не менее 1 МГц. По существу же метод CDMA достаточно сложен, и не только в отношении принципов построения, но и в плане практической реализации. Как и TDMA, метод CDMA может быть реализован только в цифровой форме. Подробное рассмотрение и обсуждение метода несколько затрудняется, кроме того, тем, что при обилии публикаций теоретического характера опыт его практического применения пока ограничен.

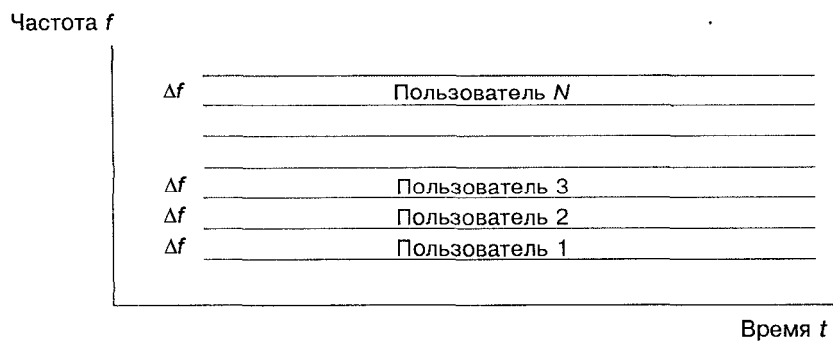


Рис. 2.26. Метод FDMA в координатах время – частота

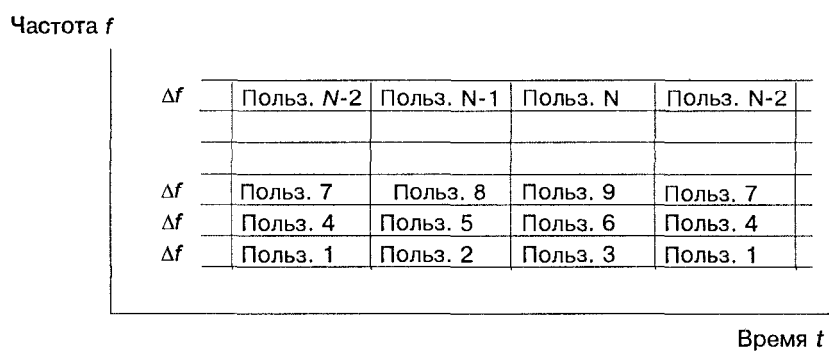


Рис. 2.27. Метод TDMA в координатах время – частота

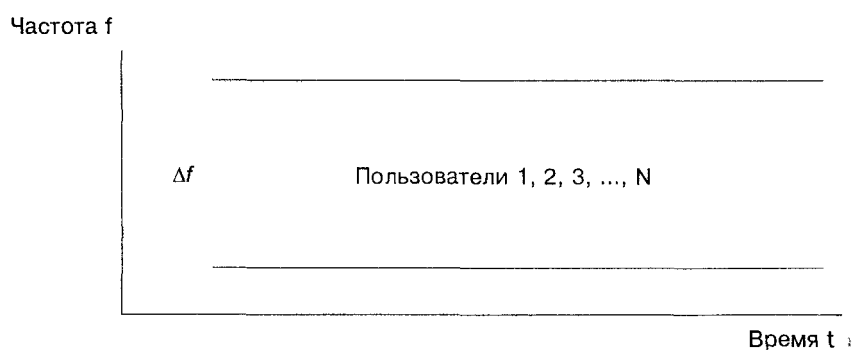


Рис. 2.28. Метод CDMA в координатах время – частота

Последовательность нашего знакомства с методом CDMA будет такой: сначала мы отметим общие принципы метода и вытекающие из них общие достоинства; затем рассмотрим некоторые детали технической реализации, что, по нашему мнению, должно облегчить как понимание принципов, так и оценку технических возможностей; после этого обсудим основные технические особенности метода, многие из которых в зависимости от точки зрения иногда преподносятся или как его достоинства, или же как недостатки; в заключение мы подведем итоги, в том числе в сопоставлении с методом TDMA. При этом мы будем в значительной мере ориентироваться на технические решения, заложенные в американском стандарте IS-95 и реализованные в разработках компании Qualcomm (США) – это первые и пока единственные практические проработки по методу CDMA в применении к сотовой связи.

Существующие работы относились к областям военной и спутниковой связи, где главными достоинствами CDMA были скрытность и высокая помехоустойчивость. Основная особенность метода CDMA – это работа в широкой полосе частот, значительно превышающей полосу сигнала речи, в сочетании с таким кодированием информации каждого из физических каналов, которое позволяет выделять ее из общей широкой полосы, используемой одновременно всеми физическими каналами. Система связи, реализующая CDMA, является системой с *расширенным спектром* (английское *spread spectrum*) – спектр информационного сообщения искусственно расширяется посредством модуляции (кодирования) периодической псевдослучайной последовательностью импульсов с достаточно малым дискретом^{*)}. Для получения ширины спектра более 1 МГц (а это, как мы увидим ниже, принципиально важно для успешной работы в условиях многолучевого распространения) длительность дискрета модулирующей последовательности должна быть менее 1 мкс. С практически используемыми методами кодирования информации мы познакомимся несколько ниже. Указанные общие принципы – расширение спектра за счет модуляции псевдослучайной последовательностью в сочетании с кодовым разделением физических каналов – однозначно определяют и общие достоинства метода CDMA: высокую помехоустойчивость, хорошую приспособленность к условиям многолучевого распространения, высокую емкость системы.

Помехоустойчивость метода – по отношению как к узкополосным, так и широкополосным помехам – может быть пояснена следующим образом. Модуляция сигнала псевдослучайной последовательностью при передаче требует его повторной модуляции той же последовательностью при приеме (что эквивалентно демодуляции сигнала), в результате чего восстанавливается исходный узкополосный сигнал. При этом подбор задержки демодулирующей последовательности производится экспериментально с точно-

^{*)} Другой вариант расширения спектра – скачки по частоте (*frequency hopping*) – мы рассмотрим в разделе 2.4.5.3.

стью до дискрета последовательности, и правильному значению задержки соответствует максимальный отклик на выходе фильтра-демодулятора; описанная схема обработки соответствует так называемому корреляционному приему [18]. Если помеха узкополосная, то демодулирующая псевдослучайная последовательность при приеме воздействует на нее как модулирующая, т.е. «размывает» ее спектр по широкой полосе W_{SS} , в результате чего в узкую полосу сигнала W_S попадает лишь $1/G$ часть мощности помехи, так что узкополосная помеха будет ослаблена в G раз, где $G = W_{SS}/W_S$ – *выигрыш обработки (processing gain)*, равный отношению полосы расширенного спектра W_{SS} к полосе W_S исходного сигнала. Например, при $W_{SS} = 1,23$ МГц и $W_S = 19,2$ кГц выигрыш обработки составляет $G \cong 65$. Если же помеха широкополосная – с полосой порядка W_{SS} или шире, то демодуляция не изменяет ширины ее спектра, и в полосу сигнала помеха попадает ослабленной во столько раз, во сколько ее полоса шире полосы W_S исходного сигнала.

Возможность успешной работы в условиях многолучевого распространения также непосредственно связана с корреляционным приемом. Если корреляционный приемник имеет несколько каналов и каждый из них может быть настроен на свою задержку сигнала, то разные каналы могут быть согласованы по задержке с сигналами, прошедшими по разным путям, а сигналы с выходов всех каналов после соответствующего выравнивания во времени могут быть просуммированы. Описанная схема носит название *рейк-приемника (RAKE receiver* – в буквальном переводе *приемник-ГРАБЛИ*; происхождение этого названия обусловлено своеобразной формой импульсной характеристики приемника, напоминающей редкую гребенку с острыми зубцами или грабли). Если учесть, что замирания сигнала (фединг), связанные с многолучевым распространением, сами по себе являются частотно-селективными и заметно ослабляются при полосе сигнала более 200...300 кГц, то ослабление замираний в методе CDMA на 20...30 дБ по сравнению с FDMA или TDMA представляется вполне естественным. При этом в методе CDMA исключается применение эквалайзера, но сохраняется целесообразность разнесенного приема. Что касается емкости системы, то ее возрастание при использовании метода CDMA не столь очевидно, и мы вернемся к этому вопросу несколько позднее в пределах этого же раздела.

Перейдем к вопросам технической реализации метода CDMA.

В технических решениях компании Qualcomm в применении к сотовой связи расширение спектра обеспечивается за счет модуляции сигнала псевдослучайной последовательностью с частотой следования дискретов (английский термин *chip* – буквально *щепка, осколок, фрагмент*) 1,23 МГц. Более точно эта частота составляет 1,2288 МГц, причем $1228,8 = 9,6 \cdot 128$, так что при частоте информационной битовой последовательности 9,6 кбит/с длительности одного бита соответствует 128 дискретов псевдослучайной моду-

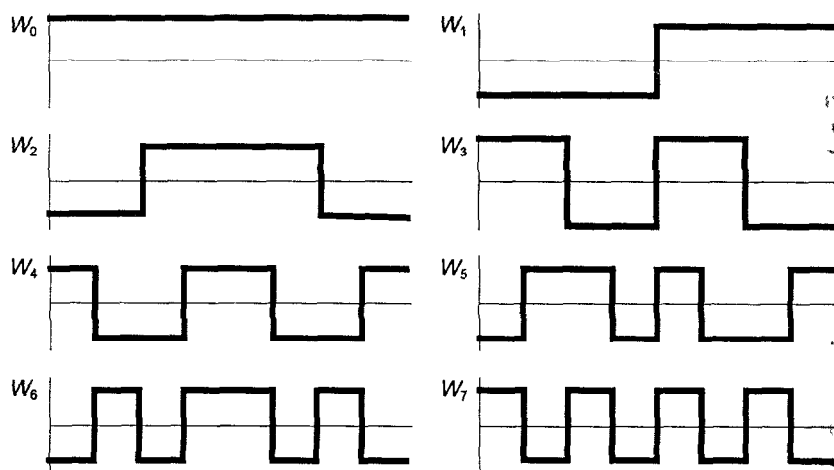


Рис.2.29. Графики функций Уолша восьми первых порядков

лирующей последовательности. Полоса сигнала с расширенным спектром по уровню 3 дБ составляет $W_{SS} = 1,23$ МГц, причем при помощи цифрового фильтра формируется спектр, близкий к прямоугольному.

Если говорить точнее, то для модуляции сигнала используются три вида функций: «короткая» и «длинная» псевдослучайные последовательности и функции Уолша (Walsh functions) порядков от 0 до 63. Последние широко используются в цифровой обработке сигналов и являются в некотором смысле дискретным аналогом синусоид (косинусоид) кратных частот; в качестве иллюстрации на рис.2.29 представлены графики функций Уолша восьми первых порядков. Длина короткой псевдослучайной кодовой последовательности составляет $2^{15}-1 = 32767$ знаков, длинной псевдослучайной последовательности — $2^{42}-1 \approx 4,4 \cdot 10^{12}$ знаков. Длительность дискрета для всех трех модулирующих функций одинакова (для функций Уолша имеется в виду дискрет функций высшего порядка) и соответствует частоте следования дискретов 1,2288 МГц.

Для кодирования речи используется алгоритм CELP (Code Excited Linear Prediction — линейное предсказание с кодовым возбуждением) с переменной частотой выдачи информации. Кодер поддерживает частоты кодирования 8, 4, 2 и 1 кбит/с, которым соответствуют скорости передачи информации в канале 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с. И в подвижной, и в базовой станциях используются многоканальные рейк-приемники (3 канала — в подвижной станции, 4 канала — в базовой), причем помимо настраиваемых на определенную задержку каналов в каждом из них имеется сканирующий

по задержке канал, что позволяет выбрать для настраиваемых каналов сигналы с наибольшей интенсивностью.

В прямом канале (от базовой станции к подвижной, рис.2.30) модуляция сигнала функциями Уолша (бинарная фазовая манипуляция) используется для различения разных физических каналов данной базовой станции; модуляция длинной псевдослучайной последовательностью (бинарная фазовая манипуляция) – с целью шифрования сообщений; модуляция короткой псевдослучайной последовательностью (квадратурная фазовая манипуляция двумя псевдослучайными последовательностями одинакового периода) – для расширения полосы и различения сигналов разных базовых станций.

Решение последней задачи – различение сигналов разных станций – обеспечивается тем, что все базовые станции используют одну и ту же пару коротких псевдослучайных последовательностей, но со сдвигом на 64 дискрета между разными станциями; при этом все физические каналы одной базовой станции имеют одну и ту же фазу последовательности.

Более конкретное назначение функций Уолша различных порядков: функция Уолша нулевого порядка (W_0) кодирует пилот-сигнал – это сигнал несущей, который используется подвижной станцией для выбора рабочей ячейки (по наиболее мощному сигналу), а также в качестве опорного для синхронного детектирования сигналов информационных каналов; функция W_{32} кодирует канал синхронизации, по которому передается также ряд служебных сообщений; функции $W_1...W_7$ используются для кодирования каналов вызова – их число может составлять от 0 до 7; остальные функции Уолша, вместе с оставшимися от каналов вызова (если число последних меньше семи), используются для кодирования каналов трафика, и число последних может составлять от 55 до 62. Для защиты информации от ошибок в прямом канале используется сверточное кодирование с длиной ограничения 9 и скоростью $1/2$, а также перемежение на интервале 20 мс.

В обратном канале (от подвижной станции к базовой, рис.2.31) модуляция сигнала короткой псевдослучайной последовательностью (квадратурная фазовая манипуляция двумя псевдослучайными последовательностями одинакового периода) используется только для расширения спектра, причем все подвижные станции используют одну и ту же пару последовательностей с одинаковым (нулевым) смещением. Модуляция сигнала длинной псевдослучайной последовательностью (бинарная фазовая манипуляция) помимо шифрования сообщений несет информацию о подвижной станции в виде ее закодированного индивидуального номера и обеспечивает различение сигналов от разных подвижных станций одной ячейки за счет индивидуального для каждой станции сдвига последовательности. Пилот-сигнала в обратном канале нет, поэтому синхронное детектирование здесь не используется.

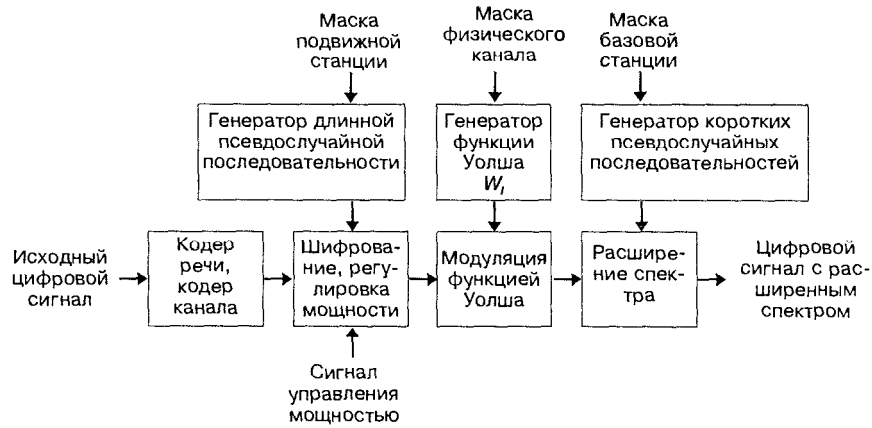


Рис.2.30. Упрощенная функциональная схема обработки сигналов в передающем тракте базовой станции (метод CDMA в разработке компании Qualcomm)

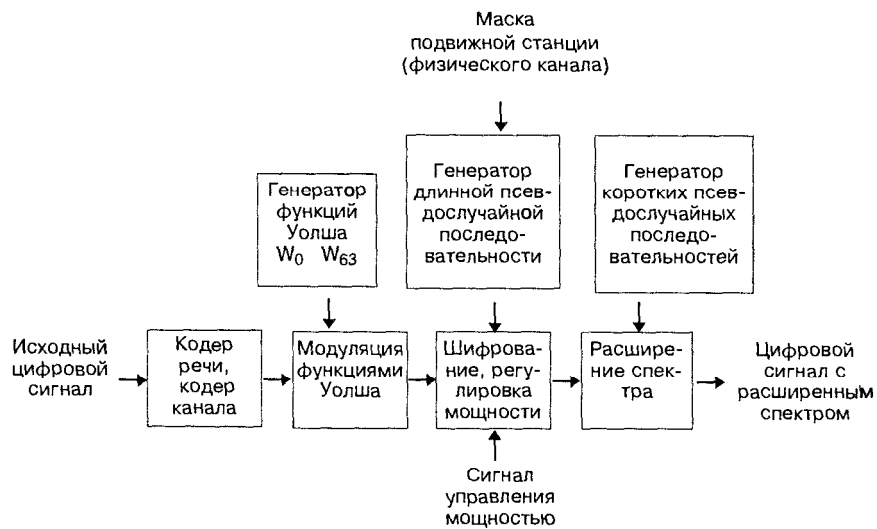


Рис.2.31 Упрощенная функциональная схема обработки сигналов в передающем тракте подвижной станции (метод CDMA в разработке компании Qualcomm)

Но зато функции Уолша используются для кодирования 6-битовых групп символов – при этом задействованы все 64 функции Уолша, поскольку $64 = 2^6$; это кодирование одинаково для всех физических каналов, а на приемном конце используются 64 параллельных канала, каждый из которых настроен на свою функцию Уолша, и эти каналы распознают (декодируют) принятые 6-битовые символы. В обратном канале, как и в прямом, для защиты от ошибок используются сверточное кодирование с длиной ограничения 9, но со скоростью 1/3 (т.е. с вдвое большей избыточностью – это тоже мера компенсации отсутствия синхронного детектирования) и перемежение на интервале 20 мс.

Подчеркнем, что описанные выше технические решения изначально были ориентированы на сочетание с североамериканским стандартом AMPS – как альтернатива методу TDMA при переходе от аналоговой обработки к цифровой.

Рассмотрим теперь подробнее технические особенности метода CDMA и попытаемся объяснить, за счет чего он может претендовать на обеспечение более высокой емкости системы сотовой связи.

Главным фактором в решении задачи получения предельной емкости является то обстоятельство, что в CDMA основной вклад в отношение сигнал/помеха (или, точнее, в отношение несущая/помеха – *Carrier to Interference ratio*, C/I) вносят мешающие сигналы других физических каналов (других пользователей) в «своей» (рабочей) ячейке, поскольку все физические каналы используют одну и ту же широкую полосу частот, тогда как в FDMA и TDMA помеховый фон создается каналами связи, работающими в других ячейках (более или менее удаленных от рабочей – в зависимости от числа ячеек в кластере) в том же частотном канале, а для TDMA – и в том же временном слоте. Поэтому в CDMA тщательная регулировка уровней сигналов, применение секторных антенн на базовых станциях и использование фактора «речевой активности» (станция излучает лишь тогда, когда абонент говорит, и не излучает в паузах речи) в сочетании с оперативным изменением числа задействованных каналов связи в пределах имеющегося ресурса позволяет практически – по месту, по конкретно складывающейся ситуации – реализовать предельно малое допустимое значение C/I, т.е. получить предельно большие пропускную способность и емкость системы. В методах FDMA и TDMA это нереализуемо, прежде всего в отношении первого фактора – регулировки уровней сигналов, так как такая регулировка возможна только по критериям своих («удаленных») ячеек, без учета отношения C/I в рассматриваемой рабочей ячейке. Поскольку в силу сложности законов распространения и затухания сигналов уровень помех от других ячеек оказывается величиной случайной и с достаточно большой дисперсией, практически это приводит к необходимости выбирать размер кластера с известным запасом, чтобы отношение C/I с достаточно большой вероятностью не опускалось ниже допустимого порога, а

это и означает некоторое недоиспользование (в среднем) частотных ресурсов системы. Практически же в FDMA и TDMA столь оперативной, как в CDMA, регулировки уровней сигналов обычно не производится, фактор «речевой активности» используется не всегда, а секторизация применяется фактически как вариант дробления ячеек. Кроме того, комбинированное использование в CDMA нескольких достаточно сложных и эффективных методов кодирования позволяет снизить порог C/I по сравнению с FDMA и TDMA. В методе CDMA имеется, очевидно, и возможность оперативной регулировки порога C/I , например кратковременного его снижения (при соответствующем ухудшении характеристик связи) для обеспечения этапа передачи обслуживания.

Из сказанного однозначно следует, что в CDMA регулировка уровней сигналов, применение секторных антенн и отработка «речевой активности» являются принципиально важными и обязательными элементами метода. При этом регулировка уровней производится как в прямом канале (дискрет 0,5 дБ, управление с обратной связью, периодичность 15...20 мс), так и в обратном (дискрет 0,5 дБ, управление без обратной связи, время реакции несколько микросекунд и с обратной связью – периодичность 1,25 мс), причем в обратном канале регулировка столь оперативна, что существенно сглаживает даже быстрые (релеевские) замирания сигнала. Указанные выше технические особенности метода CDMA, равно как и некоторые другие, можно при желании трактовать и как его достоинства, и как недостатки. Действительно, именно эти особенности обеспечивают высокие характеристики метода, и в этом смысле они, конечно, выступают как достоинства. Кроме того, они дают и некоторые дополнительные преимущества, например отработка «речевой активности» позволяет соответственно экономить энергию источника питания. С другой стороны, реализация этих особенностей достаточно сложна, что, разумеется, достоинством не является. Мы не будем вдаваться в более подробное обсуждение этих аспектов и ограничимся изложенной констатацией. Отметим еще несколько технических деталей по методу CDMA.

В этом методе нет частотного планирования, во всех ячейках используется одна и та же полоса частот. Если, в терминах разработки Qualcomm, под CDMA отведена полоса более широкая, чем минимально необходимые 1,23 МГц, то каждый из поддиапазонов в 1,23 МГц (возможно, с некоторым защитным интервалом между поддиапазонами) используется во всех ячейках с однотипной организацией работы во всех поддиапазонах. При этом в качестве коэффициента эффективности повторного использования частот указывается величина порядка $2/3$, т.е. вследствие помех от других ячеек число используемых в каждой ячейке каналов снижается в 1,5 раза по сравнению с одной изолированной ячейкой (эти коэффициенты аналогичны соответственно $1/7$ и 7 в 7-ячеечном кластере методов FDMA и TDMA).

В методе CDMA реализуется так называемая «мягкая передача обслуживания» (*soft handoff*): когда подвижная станция при-

ближается к границе ячейки, т.е. сигналы от двух базовых станций – рабочей ячейки и одной из смежных – становятся соизмеримыми по уровню (это фиксируется подвижной станцией и сообщается на базовую станцию рабочей ячейки), по команде с центра коммутации через базовую станцию смежной ячейки организуется второй канал связи с той же подвижной станцией; при этом первый канал (в «старой» ячейке) продолжает работать, т.е. подвижная станция принимает сигналы одновременно от двух базовых станций, используя технические возможности рейк-приемника – возможности приема двух «копий» одного и того же сигнала, смещенных между собой во времени. Так продолжается до тех пор, пока подвижная станция не удалится от границы ячеек, т.е. пока сигнал от второй базовой станции не станет существенно сильнее сигнала от первой. После этого канал связи через первую базовую станцию закрывается, и процесс передачи обслуживания завершается. «Мягкая передача обслуживания», безусловно, повышает качество и надежность связи, но ее организация обходится отнюдь не бесплатно: помимо того, что в процессе передачи обслуживания подвижная станция занимает не один физический канал, а два (по одному каналу в двух ячейках), регулировка уровня сигнала подвижной станции может производиться лишь по одной из ячеек, а по второй сигнал может оказаться либо слабоватым, либо великоватым и с несглаженными замираниями, с вытекающими отсюда последствиями для качества связи.

Метод CDMA требует точной синхронизации базовых станций системы. Это может быть реализовано, например, при помощи спутниковой геодезической системы GPS (Global Positioning System – Глобальная система определения местоположения), но в результате система сотовой связи оказывается не автономной.

В методе CDMA нет защитных интервалов (бланков), как в методе TDMA, а большое число знаков в используемых кодовых последовательностях облегчает сохранение конфиденциальности передаваемой информации (затрудняет ее несанкционированное декодирование). Наконец, высокая помехоустойчивость метода CDMA и распределение энергии по широкой полосе частот допускают совместную с CDMA работу некоторого числа узкополосных каналов связи в пределах той же широкой полосы при относительно небольшом уровне взаимных помех.

Подведем итоги. Метод CDMA обладает сравнительно высокой помехоустойчивостью и хорошо работает в условиях многолучевого распространения. Кроме того, он отличается высокой скрытностью, не использует частотного планирования, допускает «мягкую передачу обслуживания», но все это требует обязательно использования достаточно сложных технических решений: аккуратной регулировки уровня сигналов, применения секторных антенн и отработки «речевой активности», точной синхронизации базовых станций, причем последнее может быть связано с потерей автономности системы.

В качестве оценки емкости системы, в терминах эквивалентного числа физических каналов на ячейку, иногда приводят коэффициент увеличения порядка 20 в сравнении с методом FDMA стандарта AMPS. Если учесть, что переход от FDMA к TDMA увеличивает число физических каналов втрое, а при полускоростном кодировании – вшестеро, получается, что переход от простейшего варианта TDMA («чистого» TDMA) к CDMA может обеспечить примерно трехкратное увеличение числа каналов. Этот вывод едва ли можно считать окончательным, поскольку известны соображения и о более сильном фактически влиянии помех в CDMA, чем принималось в расчетах, приведших к указанным выше результатам, и о необходимости в некоторых ситуациях более плотного расположения базовых станций; и то, и другое в конечном счете ведет к снижению емкости системы. Кроме того, метод TDMA имеет дополнительные резервы, о которых не следует забывать при сопоставлении его по емкости с CDMA. Речь идет о скачках по частоте (FH – Frequency Hopping), предусмотренных, в частности, стандартом GSM, которые в сочетании с прерывистым излучением (отработкой «речевой активности») и оперативной регулировкой мощности излучения смягчают влияние релейских замираний и снижают средний уровень помех, т.е. позволяют реализовать большие значения коэффициента повторного использования частот. К той же цели ведет и использование адаптивного распределения каналов, в том числе в сотовых сетях иерархической структуры; в отношении построения последних TDMA имеет преимущества по сравнению с CDMA. В результате методы CDMA и TDMA оказываются примерно сопоставимыми по обеспечиваемой ими емкости. Такое мнение также высказывается в имеющихся публикациях, и оно представляется в достаточной мере правдоподобным.

Отметим в заключение, что технические решения самого метода CDMA продолжают развиваться. В рамках стандарта IS-95 разработан усовершенствованный кодер речи с частотой кодирования 13 кбит/с. Помимо упоминавшихся разработок в США (стандарт IS-95) работы по CDMA проводились в Европе, в частности в рамках проекта CODIT (Code Division Testbed), входившего в программу RACE (Research and Development in Advanced Communication Technologies in Europe), но они не дали результатов такой степени завершенности, как стандарт IS-95. В мае-июне 1997 г. было объявлено об инициативе японской компании NTT DoCoMo по разработке экспериментальной системы мобильной связи третьего поколения на основе широкополосной системы CDMA (диапазон 2 ГГц, полоса 5 МГц) с участием компаний Nokia (Финляндия), Ericsson (Швеция), Motorola и Lucent Technologies (обе – США). В числе предложений по третьему поколению мобильной связи имеется и вариант комбинированной системы TDMA/CDMA.

2.4.3.5. Пути повышения емкости системы сотовой связи

Емкость системы сотовой связи, определяемая числом абонентов, которых она может обслужить, – очень важная характеристика, и значительная часть усилий при проектировании, создании и развитии системы в большинстве случаев направляется именно на обеспечение достаточно высокой емкости. Фактически и сама сотовая связь как таковая, основанная на принципе повторного использования частот, появилась в ответ на потребность в построении системы массовой подвижной связи при использовании жестко ограниченной полосы частот. В настоящем подразделе мы в систематизированном виде перечислим четыре основных пути повышения емкости, сознательно идя на некоторое повторение очевидных или уже упоминавшихся возможностей.

Первый – это совершенствование методов обработки сигналов, в частности, переход от аналоговой обработки к цифровой, сопровождаемый переходом к более совершенным методам множественного доступа – от FDMA к TDMA и, вероятно, к CDMA, а в пределах TDMA – переход от полноскоростного кодирования речи к полускоростному. Пределом на этом пути являются, по-видимому, достижимые характеристики CDMA – это коэффициент порядка 20 (по числу физических каналов) при переходе от FDMA к CDMA.

Второй путь – дробление ячеек, т.е. переход к меньшим ячейкам в районах с интенсивным трафиком при том же коэффициенте повторного использования частот (рис.2.32); число базовых станций при этом соответственно увеличивается, а мощность излучения – как для базовых, так и для подвижных станций – снижается. Фактически тот же эффект достигается и при использовании на базовых станциях секторных антенн, например с разделением ячейки на три сектора (при 120-градусных секторах) и использованием в каждом из секторов своей полосы частот (рис. 2.33). Практически ячейки с радиусом менее 300...500 м неудобны, так как чрезмерно возрастает поток передач обслуживания. Выход просматривается в использовании многоуровневых (иерархических) схем построения сотовой сети с обслуживанием в крупных ячейках (макросотах) быстро перемещающихся абонентов (автомобилистов), а в более мелких (микросоты, пикосоты) – малоподвижных абонентов, например покупателей в пределах торгового центра.

Заметим попутно, что в некоторых случаях может оказаться необходимым не дробить, а наоборот – укрупнять ячейки, если трафик столь мал, что не обеспечивает достаточной загрузки базовой станции. Если при этом радиус ячейки превышает номинальную дальность действия передатчика базовой и/или подвижной станции, для обеспечения связи в удаленных частях ячейки приходится использовать повторители, выполняющие фактически роль ретрансляторов.

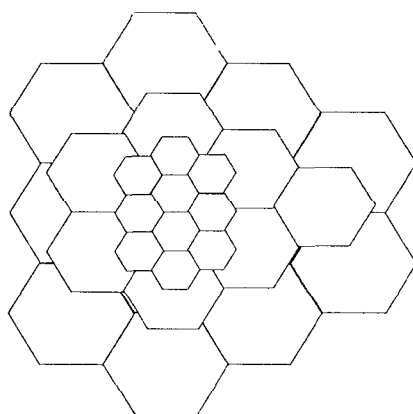


Рис 2.32. Использование ячеек меньших размеров в районах с интенсивным трафиком (в центре города)

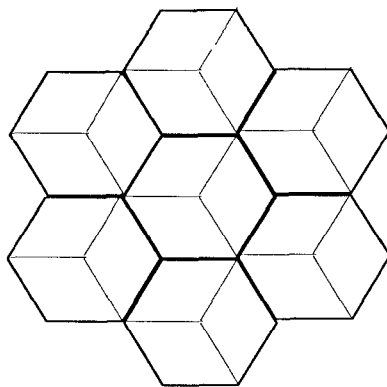


Рис.2.33. 7-элементный кластер с трехсекторными антеннами

В качестве третьего пути повышения емкости отметим возможность использования *адаптивного назначения каналов* (*Adaptive Channel Allocation – ACA*) в методах FDMA и TDMA. До сих пор мы молчаливо предполагали, что имеющийся частотный ресурс, т.е. все частотные каналы в пределах выделенной полосы частот, заранее определенным образом распределяются между ячейками кластера – равномерно или в соответствии с априорной информацией об интенсивности трафика. Возможен, однако, и иной подход. частотные каналы, все или частично, находятся в оперативном распоряжении центра коммутации, который выделяет их для пользования отдельным ячейкам (базовым станциям) по мере поступления заявок (вызовов), т.е. в соответствии с реальной интенсивностью трафика, но при соблюдении необходимого территориально-частотного разнеса. Такой адаптивный алгоритм, конечно, сложнее, но он может обеспечить определенное повышение емкости за счет гибкого отслеживания флуктуаций трафика.

Алгоритмы адаптивного назначения каналов используются в беспроводном телефоне, но в сотовой связи, насколько нам известно, более или менее широкого распространения они пока не получили. Адаптивным по существу является назначение физических каналов в методе CDMA, что позволяет в некоторых пределах перераспределять нагрузку между разными ячейками.

Наконец, четвертый путь – это тривиальное расширение выделяемой полосы частот. Разумеется, этот путь несколько очевиден, настолько же и мало полезен, и мы упоминаем о нем не в качестве рекомендации к непосредственному применению, а в виде примера преимуществ, например, GSM 1800 (или GSM 1900) по сравнению с GSM 900, которые имеют рабочие (аппаратурные) полосы 75 МГц (или 60 МГц) и 25 МГц соответственно.

2.4.4. Цифровая обработка сигналов

2.4.4.1. Роль и построение цифровой обработки. Характеристики речевых сигналов

Цифровая обработка сигналов – важный элемент в аппаратной реализации принципов сотовой связи. Именно цифровая обработка обеспечила возможность перехода от первого поколения сотовой связи ко второму с соответствующим совершенствованием методов множественного доступа, повышением емкости системы, улучшением качества связи. Только в цифровой форме оказывается возможным применение экономичного (с устранением избыточности) кодирования речи, эффективного канального кодирования с высокой степенью защиты от ошибок, совершенных методов борьбы с многолучевым распространением. Цифровая обработка сигналов в сотовой связи, как и в связи вообще, и даже шире – при обработке, хранении и передаче информации самого различного вида, например при обработке изображений, в цифровом

телевидении, в мультимедиа, – это целая эпоха, связанная как с развитием методов обработки информации, так и с появлением соответствующей массовой элементной базы (больших и сверхбольших интегральных микросхем), обеспечившей возможность практической реализации этих методов.

При рассмотрении цифровой обработки сигналов будем опираться на блок-схему рис. 2.6, отражающую все основные этапы обработки и их последовательность. В соответствии с этой схемой мы рассмотрим:

- аналого-цифровое преобразование сигналов;
- кодирование речи;
- канальное кодирование;
- модуляцию.

Каждому из этапов обработки в передающем тракте соответствует этап обработки в приемном, так что в идеализированной ситуации – при отсутствии шумов, помех и искажений при обработке и распространении сигналов – форма сигнала в соответствующих точках передающего и приемного трактов, например на выходе кодера речи и на входе декодера речи, на выходе АЦП и на входе ЦАП, тождественно одинакова. Реально этой тождественности не получается, но обработка сигналов должна быть построена таким образом, чтобы искажения не превышали допустимых пределов. Того, как оцениваются и контролируются эти искажения, мы коснемся в разд. 2.4.4.3 и 2.4.4.4. При рассмотрении этапов цифровой обработки мы ограничимся изложением их принципов, без детализации схемотехнических решений, поэтому фактически наше изложение в значительной мере будет относиться сразу к обоим соответствующим друг другу блокам, один из которых находится в передающем тракте, а другой – в приемном: к модулятору и демодулятору, к кодеру и декодеру, к АЦП и ЦАП. Особняком остается блок эквалайзера, которому нет пары в передающем тракте; работу эквалайзера мы рассмотрим в разд. 2.4.5.4.

Используемые в сотовой связи методы цифровой обработки сигналов, характеристики и параметры реализующих их устройств, в частности АЦП и кодера, теснейшим образом связаны с характеристиками передаваемых речевых сигналов. Поэтому мы коротко остановимся на последних. Спектр мощности сигнала речи имеет максимум вблизи частоты 400 Гц и спадает на более высоких частотах со скоростью около 9 дБ на октаву. В соответствии с рекомендациями Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (МККТТ), при аналого-цифровом преобразовании и цифровой обработке сигнала речи ограничиваются интервалом частот 300...3400 Гц. Длительность звуков речевого сигнала составляет от нескольких десятков до нескольких сотен миллисекунд при среднем значении 130 мс, причем среднее значение для гласных звуков 210 мс, а для согласных 95 мс. В задачах кодирования сигнал речи часто рассматривают как квазистационарный гауссовский процесс, спектрально-корреляционные характеристики которого постоянны на интервале 20...30 мс. При телефонном

разговоре мгновенный уровень речевого сигнала изменяется в диапазоне 35...40 дБ. При этом уровень согласных в среднем на 20 дБ ниже уровня гласных.

Слуховое ощущение громкости примерно пропорционально логарифму интенсивности воздействия. Пороговое для слуха изменение уровня звука не превышает ± 1 дБ. Слух слабо чувствителен к точности передачи фазовых соотношений составляющих сигнала. Постоянная времени слуха в среднем составляет: при нарастании сигнала 20...30 мс, при спаде 100...200 мс.

Закончив этим вводную часть, перейдем к последовательному рассмотрению этапов цифровой обработки.

2.4.4.2. Аналого-цифровое преобразование

Аналого-цифровое преобразование является первым этапом цифровой обработки сигналов в передающем тракте (рис.2.6). Как подсказывает само название, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) является связующим элементом между аналоговым и цифровым участками тракта, преобразующим непрерывный аналоговый сигнал с выхода микрофона в цифровую форму, так что вся последующая обработка производится с сигналом, представленным в цифровом виде. Соответственно цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) – последний элемент в цифровом приемном тракте, и задача его прямо противоположна: он преобразует цифровой сигнал в аналоговый, а последний поступает на динамик, преобразующий его в акустический сигнал, воспринимаемый ухом.

Работа АЦП складывается из двух этапов, которые в реальном устройстве часто не могут быть четко отделены один от другого: дискретизации входного непрерывного сигнала во времени – обычно с постоянным шагом, т.е. через равные интервалы времени, и квантования величины сигнала по уровню для этих дискретных моментов времени. В результате на выходе АЦП с фиксированным темпом, определяемым периодом дискретизации, появляются двоичные числа, т.е. наборы единиц и нулей, соответствующие уровням сигнала в моменты дискретизации. Этот процесс схематически иллюстрируется рис. 2.34, на котором моменты дискретизации показаны штрихами на оси времени и для трех моментов дискретизации указаны уровни сигнала – в десятичном и двоичном представлении.

В соответствии с теоремой Котельникова, частота дискретизации должна быть по крайней мере вдвое выше наибольшей частоты в спектре обрабатываемого сигнала. Поскольку, как указывалось в предыдущем разделе, при цифровой передаче сигналов речи по телефонным каналам связи ограничиваются полосой частот от 300 до 3400 Гц, общепринятой является частота дискретизации $F_d = 8$ кГц.

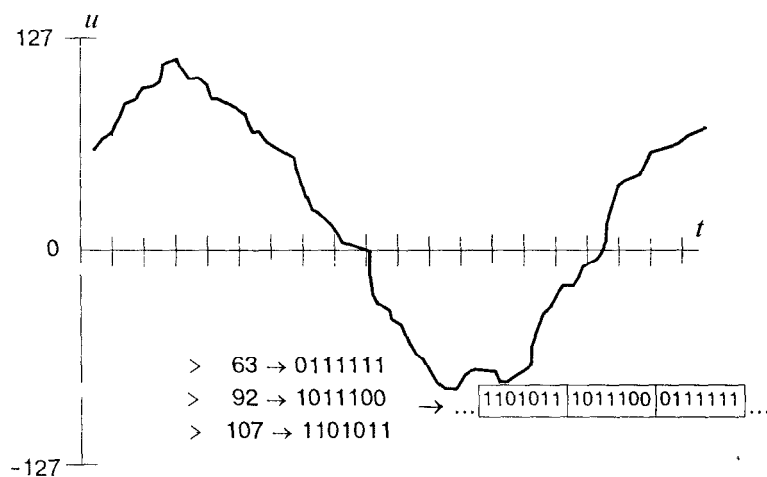


Рис. 2.34. АЦП осуществляет дискретизацию непрерывного сигнала во времени и квантование по уровню, преобразуя непрерывный аналоговый сигнал в последовательность импульсов (двоичных единиц – бит), несущих информацию об уровне сигнала в момент дискретизации

Число двоичных разрядов АЦП обычно выбирается равным 8, включая знаковый разряд, так что диапазон чисел на выходе АЦП составляет от -127 до +127, поскольку $127 = 2^7 - 1$.

В результате на выходе АЦП получается поток 8-битовых чисел, следующих с частотой 8 кГц, т.е. поток информации на выходе АЦП составляет 64 кбит/с. Практические схемы АЦП чаще всего строятся на основе сравнения выборок мгновенных значений аналогового сигнала с набором эталонов, каждый из которых содержит определенное число уровней квантования.

В схемах ЦАП, как правило, используется формирование аналоговых величин (токов), пропорциональных весовым коэффициентам разрядов входного двоичного кода, с последующим суммированием в разрядах кода, содержащих единицы. АЦП и ЦАП выпускаются промышленностью серийно в виде микросхем, характеризующихся определенными значениями разрядности и быстродействия.

Примеры схем АЦП и ЦАП можно найти, например, в учебном пособии Гольденберга с соавторами [24], а более подробные сведения об АЦП и ЦАП – в изданиях типа монографии Бахтиярова с соавторами [11].

2.4.4.3. Кодирование речи

Кодер речи является первым элементом собственно цифрового участка передающего тракта, следующим после АЦП (рис.2.6). Основная задача кодера (английский термин *encoder*) – предельно возможное сжатие сигнала речи, представленного в цифровой форме, т.е. предельно возможное устранение избыточности речевого сигнала, но при сохранении приемлемого качества передачи речи. Компромисс между степенью сжатия и сохранением качества отыскивается экспериментально, а проблема получения высокой степени сжатия без чрезмерного снижения качества составляет основную трудность при разработке кодера. В приемном тракте перед ЦАП размещен декодер речи; задача декодера (английский термин *decoder*) – восстановление обычного цифрового сигнала речи, с присущей ему естественной избыточностью, по принятому кодированному сигналу. Сочетание кодера и декодера называют кодеком (английский термин – *codec*).

Прежде чем перейти к рассмотрению кодеров речи, используемых в сотовой связи, приведем некоторые общие сведения об основных методах кодирования.

Исторически сложилось два направления кодирования речи: кодирование формы сигнала (*waveform coding*) и кодирование источника сигнала (*source coding*). Первый метод основан на использовании статистических характеристик сигнала и практически не зависит от механизма формирования сигнала. Кодеры этого типа с самого начала обеспечивали высокое качество передачи речи (хорошую разборчивость и натуральность речи), но отличались меньшей по сравнению со вторым методом экономичностью. В методе кодирования формы сигнала используются три основных способа кодирования: импульсно-кодовая модуляция, ИКМ (английское наименование *Pulse Code Modulation* – *PCM*), дифференциальная ИКМ – ДИКМ (*Differential PCM* – *DPCM*) и дельта-модуляция – ДМ (*Delta Modulation* – *DM*). ИКМ соответствует цифровой сигнал непосредственно с выхода АЦП, в нем сохраняется вся избыточность аналогового речевого сигнала. При ДИКМ эта избыточность несколько уменьшается за счет того, что квантованию с последующим кодированием и передачей по линии связи подвергается разность между исходным речевым сигналом и его предсказанным значением, а при приеме разностный сигнал складывается с предсказанным значением, полученным по тому же алгоритму предсказания. Шкала квантования может быть равномерной, неравномерной или адаптивно изменяемой; предсказание сигнала может быть не зависящим от формы последнего или же зависеть от формы сигнала, т.е. быть адаптивным. Если при кодировании сигнала используются элементы адаптации, то соответствующую разновидность ДИКМ называют адаптивной ДИКМ – АДИКМ (*Adaptive DPCM* – *ADPCM*). ДМ – это ДИКМ с однобитовым квантованием, она также может быть адаптивной (АДМ). АДИКМ находит применение, например, в беспроводном телефоне с коэффициентом сжатия

сигнала около 2. В сотовой связи используется исключительно второй метод кодирования, как более экономичный, – коэффициент сжатия порядка 5...8 с увеличением его в перспективе еще вдвое.

Второй метод – кодирование источника сигнала, или кодирование параметров сигнала, – первоначально основывался на данных о механизмах речеобразования, т.е. использовал своего рода модель голосового тракта и приводил к системам типа анализ-синтез, получившим название *вокодерных систем* или *вокодеров* (*vocoder* – сокращение от *voice coder*, т.е. кодер голоса или кодер речи). Уже ранние вокодеры позволяли получить весьма низкую скорость передачи информации, но при характерном «синтетическом» качестве речи на выходе. Поэтому вокодерные методы долгое время оставались в основном областью приложения усилий исследователей и энтузиастов, не находя широкого практического применения. Ситуация существенно изменилась с выходом на сцену метода линейного предсказания, предложенного в 60-х годах и получившего мощное развитие в 80-х, в том числе в прямой связи с разработкой речевых кодеков для цифровых систем сотовой связи. Именно вокодерные методы на основе линейного предсказания и применяются в сотовой связи, причем зависимость этих методов от данных о механизмах речеобразования отстает на второй или даже третий план, а оценка передаваемых по линии связи параметров производится на основе статистических характеристик сигнала по жестко определенному алгоритму, как и при кодировании формы сигнала. Поэтому фактически граница между двумя классическими методами кодирования – кодирования формы сигнала и кодирования источника сигнала – до некоторой степени стирается.

Перейдем непосредственно к кодерам речи, применяемым в сотовой связи, и рассмотрим следующие вопросы: принцип построения кодеров речи на основе метода линейного предсказания; сущность метода линейного предсказания; типы фильтров линейного предсказания, используемые в кодеках; практические схемы кодеков стандартов D-AMPS и GSM; методы оценки качества кодирования, позволяющие сопоставлять различные типы и варианты кодеков; перспективы развития методов кодирования.

Суть кодирования речи на основе метода линейного предсказания (*Linear Predictive Coding – LPC*) заключается в том, что по линии связи передаются не параметры речевого сигнала, как такового, а параметры некоторого фильтра, в известном смысле эквивалентного голосовому тракту, и параметры сигнала возбуждения этого фильтра. В качестве такого фильтра используется фильтр линейного предсказания. Задача кодирования на передающем конце линии связи заключается в оценке параметров фильтра и параметров сигнала возбуждения, а задача декодирования на приемном конце – в пропускании сигнала возбуждения через фильтр, на выходе которого получается восстановленный сигнал речи. Различные варианты алгоритмов кодирования отличаются один от

другого набором передаваемых параметров фильтра, методом формирования сигнала возбуждения и тому подобными деталями.

Метод линейного предсказания заключается в том, что очередная выборка речевого сигнала S_n с некоторой степенью точности предсказывается линейной комбинацией M предшествующих выборок:

$$S_n' = \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i},$$

где a_i – коэффициенты линейного предсказания, M – порядок предсказания. Разность между истинным и предсказанным значениями выборки определяет ошибку предсказания (остаток предсказания):

$$e_n = S_n - S_n' = S_n - \sum_{i=1}^M a_i S_{n-i}.$$

В результате z -преобразования этого разностного уравнения получаем

$$E(z) = S(z) - \sum_{i=1}^M a_i S(z) z^{-i} = S(z) A(z),$$

где функция $A(z)$

$$A(z) = 1 - \sum_{i=1}^M a_i z^{-i}$$

интерпретируется как передаточная характеристика некоторого фильтра (инверсного фильтра или фильтра-анализатора), частотная характеристика которого обратна по отношению к частотной характеристике голосового тракта. При подаче речевого сигнала на вход инверсного фильтра на выходе фильтра получается сигнал возбуждения, подобный (с точностью до ошибок, определяемых конечностью порядка предсказания M и погрешностью оценки коэффициентов предсказания) сигналу возбуждения на входе фильтра голосового тракта.

Полученное выражение для $A(z)$ соответствует структуре трансверсального фильтра (рис. 2.35). Порядок предсказания выбирается из условия компромисса между качеством передачи речи и пропускной способностью линии связи; практически M берется порядка 10.

Значения коэффициентов предсказания, постоянные на интервале кодируемого сегмента речи (на практике длительность сегмента составляет 20 мс), находятся из условия минимизации среднеквадратического значения остатка предсказания на интервале сегмента.

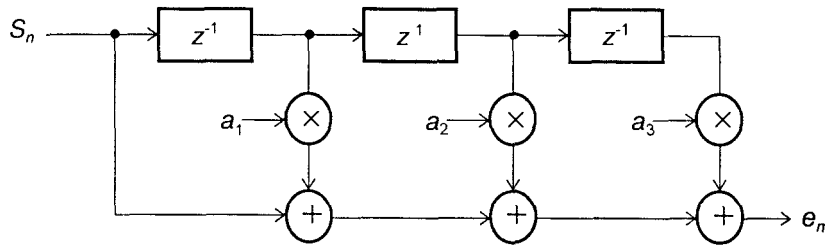


Рис.2.35. Анализирующий трансверсальный фильтр при порядке предсказания $M = 3$

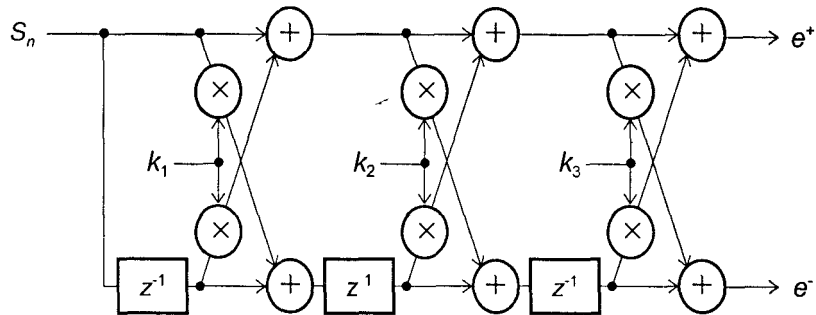


Рис 2 36 Анализирующий решетчатый фильтр при порядке предсказания $M = 3$ (e^+ и e^- - остатки предсказания вперед и назад)

Для этого частные производные $\partial(\sum e_n^2)/\partial a_i$ приравниваются к нулю, что приводит к системе M линейных уравнений с M неизвестными коэффициентами a_i . Матрица системы и метод ее решения оказываются несколько различными в зависимости от того, какими свойствами наделяется речевой сигнал на интервале преобразуемого сегмента речи.

Если речевой сигнал на этом интервале считается стационарным случайным процессом (автокорреляционный метод оценки коэффициентов предсказания), то матрица системы теплицева,

система решается с помощью итерационной процедуры алгоритма Дарбина, и фильтр-синтезатор получается заведомо устойчивым. Если речевой сигнал считается нестационарным процессом (ковариационный метод оценки коэффициентов предсказания), то матрица системы симметрична, но не теплицева, система решается с использованием разложения Холецкого, а для обеспечения устойчивости фильтра-синтезатора ковариационный метод приходится соответствующим образом модифицировать.

В обоих случаях (как в автокорреляционном методе, так и в ковариационном) в качестве побочного результата решения получаются значения так называемых *коэффициентов отражения*, или *коэффициентов частичной корреляции* (*partial correlation coefficients*, или *PARCOR coefficients*) k_i , $i=1, \dots, M$, число которых равно числу коэффициентов линейного предсказания a_i , и которые связаны с коэффициентами a_i взаимно однозначными нелинейными функциональными соотношениями. Коэффициенты отражения непосредственно связаны с другой формой фильтра линейного предсказания – так называемым *решетчатым*, или *лестничным* (*lattice*), фильтром (рис. 2.36). Коэффициенты отражения k_i более удобны, чем коэффициенты линейного предсказания a_i , для передачи по линии связи, так как в силу своих статистических характеристик в меньшей степени могут приводить к потере устойчивости фильтра при квантовании. Иначе говоря, они требуют меньшего числа разрядов при квантовании, т.е. приводят к более экономичному использованию линии связи. Иногда используются также функции от коэффициентов отражения – *логарифмические отношения площадей* (*Log-Area Ratio – LAR*):

$$r_i = \log \frac{1 - k_i}{1 + k_i},$$

название которых связано с моделью голосового тракта в виде набора акустических труб различных сечений.

Вернемся к выражению для $A(z)$, определяющему передаточную характеристику фильтра-анализатора. Передаточная характеристика фильтра-синтезатора $H(z)$ обратна ей с точностью до скалярного коэффициента усиления G .

$$H(z) = G / A(z).$$

Синтезирующий фильтр имеет ту же структуру, что и анализирующий (инверсный), и определяется тем же набором параметров (коэффициентов предсказания a_i , или коэффициентов отражения k_i , или логарифмических отношений площадей r_i), но входы и выходы в анализирующем и синтезирующем фильтрах меняются местами. Если на вход синтезирующего фильтра подать сигнал возбуждения, то на его выходе будет получен речевой сигнал с тем качеством, которое обеспечивается фильтром при принятом порядке предсказания, используемом числе дискретов для кванто-

вания параметров фильтра и прочих ограничениях и погрешностях того же характера.

Таким образом, процедура кодирования речи в методе линейного предсказания сводится к следующему (рис.2.37):

- оцифрованный сигнал речи нарезается на сегменты длительностью 20 мс (160 выборок по 8 бит в каждом сегменте);
- для каждого сегмента оцениваются параметры фильтра линейного предсказания и параметры сигнала возбуждения; в качестве сигнала возбуждения в простейшем (по идее) случае может выступать остаток предсказания, получаемый при пропускании сегмента речи через фильтр линейного предсказания с параметрами, полученными из оценки для данного сегмента;
- параметры фильтра и параметры сигнала возбуждения кодируются по определенному закону и передаются в канал связи.

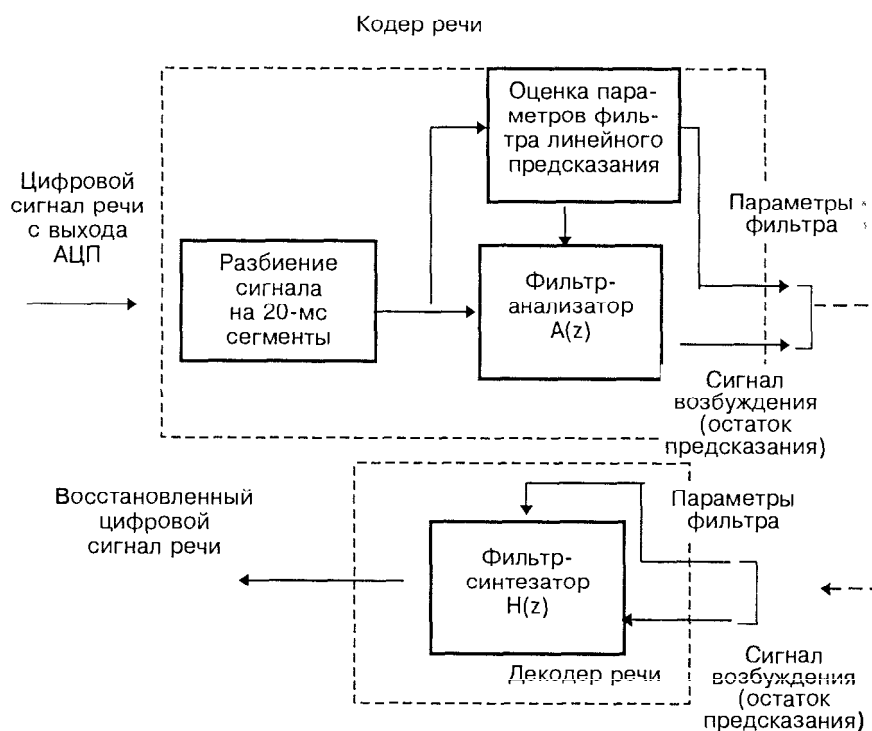


Рис.2.37. Работа кодека речи в методе линейного предсказания

Процедура декодирования речи заключается в пропуске принятого сигнала возбуждения через синтезирующий фильтр известной структуры, параметры которого переданы одновременно с сигналом возбуждения. Подчеркнем, что как анализирующий, так и синтезирующий фильтры являются цифровыми и процедуры кодирования и декодирования речи реализуются в соответствующих вычислителях (процессорах). Сигнал на вход анализирующего фильтра поступает непосредственно с выхода АЦП, а выходной сигнал синтезирующего фильтра попадает на вход ЦАП (рис. 2.6).

Приведенное описание процессов кодирования и декодирования речи не является исчерпывающим, оно объясняет лишь принцип действия кодека. Практические схемы заметно сложнее, и это связано в основном со следующими двумя моментами.

Во-первых, описанная выше схема линейного предсказания – кратковременное предсказание (*Short-Term Prediction – STP*) – не обеспечивает достаточной степени устранения избыточности речи. Поэтому, в дополнение к кратковременному предсказанию, используется еще долговременное предсказание (*Long-Term Prediction – LTP*), в значительной мере устраняющее остаточную избыточность и приближающее остаток предсказания по своим статистическим характеристикам к белому шуму.

Во-вторых, использование остатка предсказания в качестве сигнала возбуждения оказывается недостаточно эффективным, так как требует для кодирования слишком большого числа бит. Поэтому практическое применение находят более экономичные (по загрузке канала связи, но отнюдь не по вычислительным затратам) методы формирования сигнала возбуждения. В ранних кодеках линейного предсказания для формирования сигнала возбуждения передавались сигнал тон/шум (двоичный признак, указывающий, является ли передаваемый сегмент речи вокализованным, т.е. тональным, или невокализованным, т.е. шумовым), период основного тона и амплитуда сигнала. В начале 80-х годов была предложена модель многоимпульсного возбуждения, не использующая классификацию сегментов речи по признаку вокализованный/невокализованный. С этой моделью связано значительное улучшение качества кодеков линейного предсказания, и в настоящее время используются исключительно различные варианты многоимпульсного возбуждения.

Остановимся на указанных двух моментах несколько подробнее. Передаточная характеристика инверсного фильтра долговременного предсказания имеет вид

$$P(z) = 1 - \sum_{k=-M_1}^{M_2} g_k z^{-(d+k)},$$

где g_k – коэффициенты долговременного предсказания, порядок предсказания равен $M_1 + M_2 + 1$, а временная задержка d соответствует периоду основного тона (для вокализованных звуков). Обы-

чно долговременный предсказатель имеет порядок 1, т.е. $M_1 = M_2 = 0$, так что передаточная характеристика фильтра определяется единственным коэффициентом предсказания g и задержкой d :

$$P(z) = 1 - gz^{-d}.$$

Если на вход инверсного фильтра долговременного предсказания подается остаток кратковременного предсказания e_n , то на выходе получается остаток (ошибка) долговременного предсказания f_n , равный

$$f_n = e_n - ge_{n-d}.$$

Ошибка f_n весьма близка к белому гауссовскому шуму, что облегчает экономичное формирование параметров сигнала возбуждения, о чем мы расскажем чуть ниже. Параметры долговременного предсказания g и d могут быть определены, например, из условия минимизации среднеквадратического значения ошибки f_n на некотором интервале, составляющем 20...25% от длительности передаваемого сегмента речи. Задержка d обычно заключается в пределах 20...160 интервалов дискретизации сигнала, что соответствует диапазону частот основного тона 50...400 Гц. Передаточная характеристика $R(z)$ долговременного фильтра-синтезатора обратна $P(z)$ с точностью до скалярного коэффициента усиления F :

$$R(z) = F / P(z).$$

Сигнал возбуждения, аппроксимирующий (в смысле выхода фильтра-синтезатора) остаток долговременного предсказания f_n , моделируется в виде определенного числа импульсов на интервале кадра возбуждения (*excitation frame*), составляющего обычно 20...50% от длительности передаваемого сегмента речи. Для оценки параметров последовательности импульсов сигнала возбуждения существует несколько методов [162]. В методе *многоимпульсного возбуждения* (*Multi-Pulse Excitation* – MPE) оптимизируется как положение, так и амплитуды импульсов. В методе возбуждения *регулярной последовательностью импульсов* (*Regular-Pulse Excitation* – RPE) взаимное расположение импульсов предопределено заранее – используется сетка равноотстоящих импульсов, а оптимизируется расположение этой сетки в пределах кадра возбуждения (так как обычно число импульсов возбуждения в 3...4 раза меньше числа выборок в кадре) и амплитуды импульсов. В методе *стохастического кодирования*, или методе *линейного предсказания с кодовым возбуждением* (*Code-Excited Linear Prediction* – CELP), с разновидностью возбуждения *векторной суммой* (*Vector Sum Excited Linear Prediction* – VSELP), наиболее подходящий вектор возбуждения выбирается из заранее составленной кодовой книги, или кодового словаря, содержащего обычно 2^N , $N = 7...10$, квазислучайных векторов заданной длины с элементами, нормированными по амплитуде; амплитуда вектора возбуждения кодирует-

ся отдельно в соответствии с громкостью передаваемого элемента речи. Наконец, известен эффективный метод возбуждения последовательностью бинарных импульсов с преобразованием (*Transformed Binary Pulse Excitation – TBPE*), в котором сигналом возбуждения является последовательность равноотстоящих по времени и квазислучайных по знаку (с амплитудами ± 1) импульсов, умноженных на некоторую матрицу преобразования. Ограничившись приведенными общими сведениями по методам формирования сигнала возбуждения, перейдем к рассмотрению конкретных схем кодеков речи стандартов D-AMPS и GSM.

В стандарте D-AMPS используется метод кодирования VSELP. Упрощенная блок-схема кодека представлена на рис. 2.38; по-существу, она является развитием и детализацией схемы рис. 2.37. Рассмотрим сначала схему кодера.

Блок предварительной обработки выполняет следующие функции:

- предварительную цифровую фильтрацию входного сигнала с целью подъема верхних частот, на долю которых в спектре речевого сигнала приходится меньшая мощность;
- нарезание сигнала на сегменты по 160 выборкам (20 миллисекунд).

Затем для каждого 20-миллисекундного сегмента оцениваются параметры фильтра кратковременного линейного предсказания – 10 коэффициентов частичной корреляции k_i , $i = 1, \dots, 10$ (порядок предсказания $M = 10$), которые непосредственно кодируются для выдачи в канал связи, без каких-либо дополнительных функциональных преобразований. Здесь же оценивается амплитудный множитель p , определяющий энергию сегмента речи.

Сигнал с выхода блока предварительной обработки фильтруется фильтром-анализатором кратковременного линейного предсказания в форме трансверсального линейного фильтра, для чего коэффициенты частичной корреляции k_i преобразуются в коэффициенты линейного предсказания a_i .

Выходной сигнал фильтра кратковременного предсказания (остаток предсказания e_n) используется для оценки параметров долговременного предсказания – задержки d и коэффициента предсказания g , причем параметры долговременного предсказания оцениваются в отдельности для каждого из четырех подсегментов по 40 выборкам, на которые разделяется сегмент из 160 выборок.

Далее для каждого из подсегментов по 40 выборкам определяются параметры сигнала возбуждения. Для этого в составе кодера используется схема, аналогичная входящей в состав декодера, которая включает фильтры-синтезаторы кратковременного и долговременного предсказания и две кодовые книги и реализует метод «анализа через синтез» (эта часть кодера на схеме рис.2.38 подробно не раскрыта). Каждая из кодовых книг сигнала возбуждения содержит 128 кодовых векторов, по 40 элементов в каждом.

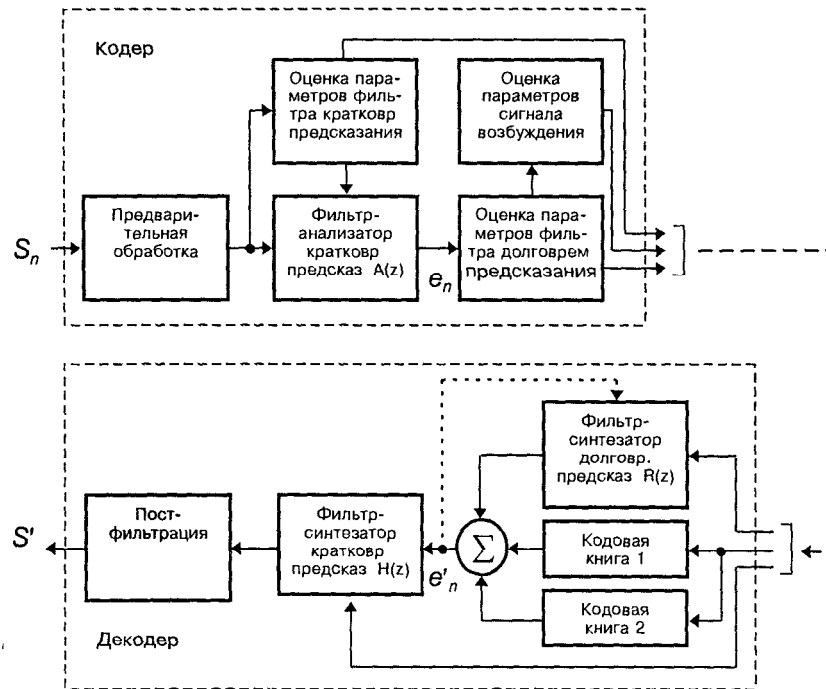


Рис.2.38. Упрощенная блок-схема кодека речи стандарта D-AMPS

Все кодовые векторы одной книги являются элементами 7-мерного линейного подпространства 40-мерного пространства, натянутого на 7 базисных векторов, причем коэффициенты линейных комбинаций, задающих кодовые векторы через векторы базиса, имеют значения +1 или -1. Таким образом, каждая кодовая книга, содержащая 128 векторов, задается семью базисными векторами и 128 кодовыми словами (7-элементными векторами коэффициентов линейных комбинаций) с однобитовыми элементами.

Сигнал возбуждения фильтра-синтезатора кратковременного предсказания, в соответствии со схемой декодера на рис. 2.38, является суммой векторов возбуждения из двух кодовых книг и вектора с выхода фильтра-синтезатора долговременного предсказания (отсюда и название метода – «с возбуждением векторной суммой»), причем векторы возбуждения из кодовых книг до подачи на сумматор умножаются на соответствующие коэффициенты усиления γ_1 и γ_2 , а входным сигналом фильтра-синтезатора долговре-

менного предсказания является, в зависимости от участка сегмента, выходной сигнал того же фильтра или суммарный сигнал возбуждения фильтра-синтезатора кратковременного предсказания. Параметры сигнала возбуждения – номера векторов возбуждения l_1 и l_2 из первой и второй кодовых книг и соответствующие коэффициенты усиления γ_1 и γ_2 – определяются по критерию минимума среднеквадратической ошибки на выходе фильтра-синтезатора кратковременного предсказания, входящего в состав кодера. Предварительно базисные векторы обеих кодовых книг ортогонализуются: для первой книги – по отношению к выходному вектору фильтра-синтезатора долговременного предсказания, для второй книги – по отношению к тому же выходному вектору и к базисным векторам первой книги.

Следовательно, выходная информация кодера речи для 20-миллисекундного сегмента включает:

- параметры фильтра кратковременного линейного предсказания – 10 коэффициентов частичной корреляции k_i , $i = 1, \dots, 10$, и амплитудный множитель ρ – один набор на весь сегмент;
- параметры фильтра долговременного линейного предсказания – коэффициент предсказания g и задержка d – для каждого из четырех подсегментов;
- параметры сигнала возбуждения – номера l_1 , l_2 векторов возбуждения из двух кодовых книг и соответствующие коэффициенты усиления γ_1 , γ_2 – для каждого из четырех подсегментов

В табл. 2 б приведена сводка выходной информации кодера с указанием числа бит, используемых для кодирования. Общий объем информации, выдаваемой для 20-миллисекундного сегмента речи, составляет 159 бит. Поскольку исходный объем информации на входе кодера составляет 1280 бит (160 выборок по 8 бит), кодер речи осуществляет сжатие информации более чем в 8 раз ($1280 : 159 = 8,05$). Перед выдачей в канал связи выходная информация кодера речи подвергается дополнительно каналному кодированию, причем разные параметры, в зависимости от их важности для обеспечения качества передачи речи, кодируются с различной степенью избыточности. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в подразд. 2.4.4.4.

Рассмотрим схему декодера, что представляется теперь уже достаточно простым делом. Сигнал возбуждения фильтра-синтезатора кратковременного предсказания формируется таким же образом, как и в синтезирующей схеме кодера: по номерам l_1 , l_2 из кодовых книг выбираются векторы возбуждения, которые умножаются соответственно на коэффициенты γ_1 , γ_2 и складываются с выходным вектором фильтра-синтезатора долговременного предсказания, определяемого параметрами g , d .

Таблица 2.6. Кодирование выходной информации кодера речи стандарта D-AMPS

Передаваемые параметры	Число бит	Примечания
Параметры фильтра кратковременного предсказания (коэффициенты частичной корреляции $k_i, i = 1, \dots, 10$)	38	k_1 – 6 бит, k_2, k_3 – по 5 бит, k_4, k_5 – по 4 бита, k_6, k_9 – по 3 бита, k_{10} – 2 бита
Амплитудный множитель (энергия сегмента) ρ	5	
Задержка фильтра долговременного предсказания d (для каждого из четырех подсегментов)	28	7 бит на каждый подсегмент
Номера векторов возбуждения l_1, l_2 из двух кодовых книг (для каждого из четырех подсегментов)	56	l_1, l_2 – по 7 бит
Коэффициенты усиления g, γ_1, γ_2 (для каждого из четырех подсегментов)	32	8 бит на каждый подсегмент, векторному квантованию и кодированию подвергаются некоторые функции от g, γ_1, γ_2
Всего за 20-миллисекундный сегмент	159	

Далее сигнал возбуждения фильтруется фильтром-синтезатором кратковременного предсказания в форме трансверсального фильтра, т.е. параметры фильтра приходится преобразовывать – от коэффициентов частичной корреляции k_i переходить к коэффициентам предсказания a_i . Для улучшения субъективного качества синтезированной речи выходной сигнал фильтра-синтезатора подвергается цифровой адаптивной пост-фильтрации, и с выхода пост-фильтра получается восстановленный цифровой сигнал речи.

В стандарте GSM используется метод RPE-LTP (Regular Pulse Excited Long Term Predictor – линейное предсказание с возбуждением регулярной последовательностью импульсов и долговременным предсказателем). Упрощенная блок-схема кодека представлена на рис. 2.39.

Начнем с рассмотрения кодера. Блок предварительной обработки осуществляет:

- предсказание входного сигнала при помощи цифрового фильтра, подчеркивающего верхние частоты;
- нарезание сигнала на сегменты по 160 выборок (20 миллисекунд);
- взвешивание каждого из сегментов окном Хэмминга («косинус на пьедестале» – амплитуда сигнала плавно спадает от центра окна к краям).

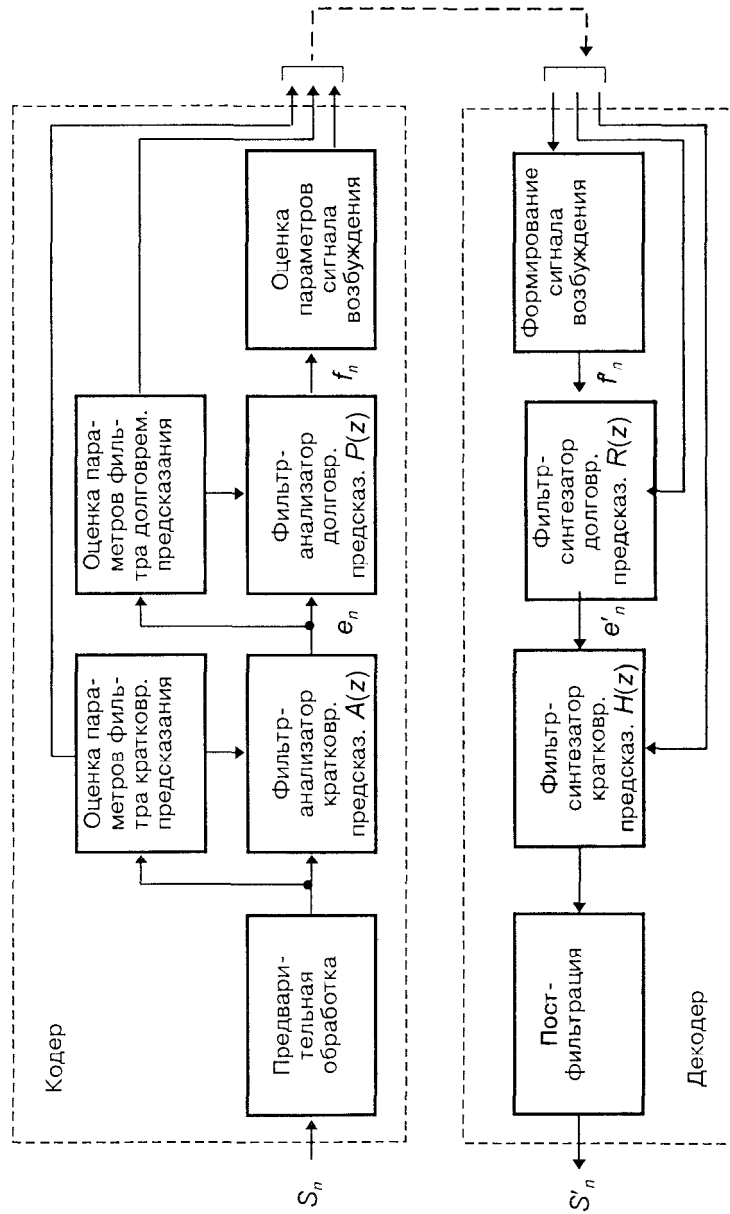


Рис. 2.39. Упрощенная блок-схема кодека речи стандарта GSM

Далее для каждого 20-миллисекундного сегмента оцениваются параметры фильтра кратковременного линейного предсказания – 8 коэффициентов частичной корреляции k_i , $i = 1, \dots, 8$ (порядок предсказания $M = 8$), которые для передачи по каналу связи преобразуются в логарифмические отношения площадей r_i , причем для функции логарифма используется кусочно-линейная аппроксимация.

Сигнал с выхода блока предварительной обработки фильтруется решетчатым фильтром-анализатором кратковременного линейного предсказания, и по его выходному сигналу – остатку предсказания e_n – оцениваются параметры долговременного предсказания: коэффициент предсказания g и задержка d . При этом 160-выборочный сегмент остатка кратковременного предсказания e_n разделяется на 4 подсегмента, по 40 выборок в каждом, и параметры g , d оцениваются для каждого из подсегментов в отдельности, причем для оценки задержки d для текущего подсегмента используется скользящий подсегмент из 40 выборок, перемещающийся в пределах предшествующих 128 выборок сигнала остатка предсказания e_n . Сигнал e_n фильтруется фильтром-анализатором долговременного линейного предсказания, а выходной сигнал последнего – остаток предсказания f_n – фильтруется сглаживающим фильтром, и по нему формируются параметры сигнала возбуждения, в отдельности для каждого из 40-выборочных подсегментов.

Сигнал возбуждения одного подсегмента состоит из 13 импульсов, следующих через равные промежутки времени (второе больше, чем интервал дискретизации исходного сигнала), и имеющих различные амплитуды. Для формирования сигнала возбуждения 40 импульсов подсегмента сглаженного остатка f_n обрабатываются следующим образом. Последний (сороковой) импульс отбрасывается, а первые 39 импульсов разбиваются на три последовательности: в первой – импульсы 1, 4, ...37, во второй – импульсы 2, 5, ...38, в третьей – импульсы 3, 6, ...39. В качестве сигнала возбуждения выбирается та из последовательностей, энергия которой больше. Амплитуды импульсов нормируются по отношению к импульсу с наибольшей амплитудой, и нормированные амплитуды кодируются тремя битами каждая при линейной шкале квантования. Абсолютное значение наибольшей амплитуды кодируется шестью битами в логарифмическом масштабе. Положение начального импульса 13-элементной последовательности кодируется двумя битами, т.е. номер последовательности, выбранной в качестве сигнала возбуждения для данного подсегмента.

Таким образом, выходная информация кодера речи для одного 20-миллисекундного сегмента речи включает:

- параметры фильтра кратковременного линейного предсказания – 8 коэффициентов логарифмического отношения площадей r_i , $i = 1, \dots, 8$ – один набор на весь сегмент;

- параметры фильтра долговременного линейного предсказания – коэффициент предсказания g и задержка d – для каждого из четырех подсегментов;
- параметры сигнала возбуждения – номер последовательности n , максимальная амплитуда v , нормированные амплитуды b_i , $i = 1, \dots, 13$, импульсов последовательности – для каждого из четырех подсегментов.

Число бит, отводимых на кодирование передаваемых параметров, приведено в табл. 2.7. Всего для одного 20-миллисекундного сегмента речи передается 260 бит информации, т.е. здесь кодер речи осуществляет сжатие информации почти в 5 раз ($1280 : 260 = 4,92$). Перед выдачей в канал связи выходная информация кодера речи также подвергается дополнительно каналному кодированию.

Таблица 2.7. Кодирование выходной информации кодера речи стандарта GSM

Передаваемые параметры	Число бит	Примечания
Параметры фильтра кратковременного предсказания (логарифмические отношения площадей r_i , $i = 1, \dots, 8$)	36	r_1, r_2 – по 6 бит; r_3, r_4 – по 5 бит; r_5, r_6 – по 4 бита; r_7, r_8 – по 3 бита
Параметры фильтра долговременного предсказания (коэффициент предсказания g , задержка d , для каждого из четырех подсегментов)	36	g – 2 бита, d – 7 бит
Параметры сигнала возбуждения (номер последовательности n , максимальная амплитуда v , нормированные амплитуды импульсов b_i , $i = 1, \dots, 13$, для каждого из четырех подсегментов)	188	n – 2 бита, v – 6 бит, b_i – 3 бита
Всего за 20-миллисекундный сегмент	260	

Перейдем к декодеру. Последовательность выполняемых им функций в общем понятна из нижней части блок-схемы рис. 2.39, и мы ограничимся небольшими пояснениями к ней. Блок формирования сигнала возбуждения, используя принятые параметры сигнала возбуждения, восстанавливает 13-импульсную последовательность сигнала возбуждения для каждого из подсегментов сигнала речи, включая амплитуды импульсов и их расположение во времени. Сформированный таким образом сигнал возбуждения фильтруется фильтром-синтезатором долговременного предсказания, на

выходе которого получается восстановленный остаток предсказания фильтра-анализатора кратковременного предсказания.

Последний фильтруется решетчатым фильтром-синтезатором кратковременного предсказания, причем параметры фильтра предварительно преобразуются из логарифмических отношений площадей r_i в коэффициенты частичной корреляции k_i . Выходной сигнал фильтра-синтезатора кратковременного предсказания фильтруется (в блоке пост-фильтрации) цифровым фильтром, восстанавливающим амплитудные соотношения частотных составляющих сигнала речи, т.е. компенсирующим предискажение, внесенное входным фильтром блока предварительной обработки кодера. Сигнал на выходе постфильтра является восстановленным цифровым сигналом речи.

Таким образом, мы рассмотрели все намеченные вопросы, относящиеся к собственно кодированию речи в сотовой связи. Однако, прежде чем закончить этот раздел, остановимся еще на двух вопросах: методах оценки качества кодирования и непрерывно продолжающемся прогрессе в технике кодирования.

Из предшествующего изложения ясно, что создание экономичного и совершенного кодека речи является сложным творческим процессом, связанным с непрерывными поисками и находками, причем многие технические решения настолько разнородны, что их сопоставление само по себе оказывается непростой задачей. Поэтому совершенно необходимы методы и критерии, позволяющие более или менее объективно сопоставлять и оценивать различные методы кодирования и на основании этих оценок принимать обоснованные решения. Такие методы существуют, и основанные критерии в них связаны с восприятием речи человеком, т.е. с экспертными оценками.

При оценке качества кодирования и сопоставлении различных кодеков оцениваются разборчивость речи и качество синтеза (качество звучания) речи. Для оценки разборчивости речи используется метод DRT (Diagnostic Rhyme Test – диагностический рифмованный тест). В этом методе подбираются пары близких по звучанию слов, отличающихся отдельными согласными (типа “дот – тот”, “кол – гол”), которые многократно произносятся рядом дикторов, и по результатам испытаний оценивается доля искажений. Метод позволяет получить как оценку разборчивости отдельных согласных, так и общую оценку разборчивости речи.

Для оценки качества звучания используется критерий DAM (Diagnostic Acceptability Measure – диагностическая мера приемлемости). Испытания заключаются в чтении несколькими дикторами, мужчинами и женщинами, ряда специально подобранных фраз, которые прослушиваются на выходе тракта связи рядом экспертов-слушателей, выставляющих свои оценки по 5-балльной шкале. Результатом является *средняя субъективная оценка*, или *средняя оценка мнений* (*Mean Opinion Score – MOS*). Хотя этот метод является субъективным по своей сути, его результаты по сопоставлению различных типов кодеков при проведении испытаний одними

и теми же группами дикторов и экспертов-слушателей являются, по-видимому, достаточно объективными, и на них основываются практически все выводы и решения.

В качестве примера в табл. 2.8 приведены результаты оценки четырех типов кодеков. Близкие к шкале MOS результаты дает объективный метод оценки качества с использованием понятия кепстрального расстояния (Cepstrum Distance – CD).

Из сказанного ясно также, что существует множество вариантов кодеков речи, в том числе в классе кодеков линейного предсказания, из числа которых приходится выбирать кодек для системы сотовой связи. В частности, при разработке стандарта GSM были тщательно исследованы шесть типов кодеков-кандидатов, после чего выбор был остановлен на кодеке RPE-LTP. Работа по выбору типа кодека для стандарта GSM была завершена в 1988 г., а в 1989 г. был предложен метод VSELP, принятый затем в стандарте D-AMPS. Интенсивные работы по совершенствованию кодеков речи продолжаются и в настоящее время. Обоими стандартами – и D-AMPS, и GSM – предусмотрено введение полускоростного кодирования, которое сможет увеличить пропускную способность канала связи еще вдвое.

Таблица 2.8. Оценка кодеков речи по шкале MOS [22]

Тип кодека	Темп передачи информации, Кбит/с	Оценка MOS
PCM	64	4,12
ADPCM	32	3,78
RPE-LTP (стандарт GSM)	13	3,58
VSELP (стандарт D-AMPS)	8	3,44

В числе исследуемых вариантов для стандарта D-AMPS рассматривается возможность введения векторного квантователя параметров линейных спектральных пар с расщеплением и межкадровым предсказанием [96], а для стандарта GSM – использование метода кодирования CELP [121].

В стандарте D-AMPS уже начинает применяться усовершенствованный полноскоростной кодек - алгебраический кодек линейного предсказания с кодовым возбуждением (algebraic codebook excited linear prediction/enhanced full rate - ACELP-EFR), а в стандарте GSM - свой вариант усовершенствованного полноскоростного кодека [145, 160].

2.4.4.4. Канальное кодирование

Кодер канала – второй (и последний) элемент собственно цифрового участка передающего тракта (рис. 2.6). Он следует после кодера речи и предшествует модулятору, осуществляющему перенос информационного сигнала на несущую частоту. Основная задача кодера канала – помехоустойчивое кодирование сигнала речи, т.е. такое его кодирование, которое позволяет обнаруживать и в значительной мере исправлять ошибки, возникающие при распространении сигнала по радиоканалу от передатчика к приемнику. Помехоустойчивое кодирование осуществляется за счет введения в состав передаваемого сигнала довольно большого объема избыточной (контрольной) информации. В английской терминологии такое кодирование носит наименование *Forward Error Correcting coding (FEC coding)*, т.е. кодирование с упреждающей коррекцией ошибок, или кодирование с коррекцией ошибок на проходе^{*)}. В сотовой связи помехоустойчивое кодирование реализуется в виде трех процедур – *блочного кодирования (block coding)*, *сверточного кодирования (convolutional coding)* и *перемешивания (interleaving)*. Кроме того, если оставаться в рамках блок-схемы рис. 2.6, кодер канала выполняет еще ряд функций: добавляет управляющую информацию, которая, в свою очередь, также подвергается помехоустойчивому кодированию; упаковывает подготовленную к передаче информацию и сжимает ее во времени; осуществляет шифрование передаваемой информации, если такое предусмотрено режимом работы аппаратуры. Последовательность выполнения этих задач показана на блок-схеме рис. 2.40.

Начало технике помехоустойчивого кодирования было положено оригинальной работой Шеннона (1948 г.), который, в частности, показал, что если пропускная способность канала связи больше требуемой скорости передачи информации, т.е. больше производительности источника информации, то при использовании соответствующего алгоритма помехоустойчивого кодирования для данного канала можно построить систему связи со сколь угодно малой вероятностью ошибки на выходе.

Правда, доказав существование необходимых помехоустойчивых кодов, Шеннон не указал методов их построения, и для решения этой задачи потребовались значительные усилия и значительное время. Первый блочный код был предложен Хэммингом в 1950 г., первый сверточный код – Элиасом в 1955 г. В последующие годы помехоустойчивое кодирование получило развитие, прежде всего в направлениях построения хороших кодов и удобных схем кодирования и декодирования.

^{*)} В качестве альтернативы возможно значительно более простое помехоустойчивое кодирование, позволяющее лишь обнаруживать ошибки, но не исправлять их. Если при этом нужна коррекция ошибок, то сообщения, содержащие ошибки, передаются повторно – это коррекция ошибок с перезапросом (Automatic Repeat Request, ARQ – запрос автоматического повторения, или перезапрос). Коррекция ошибок с перезапросом используется, например, в беспроводном телефоне.

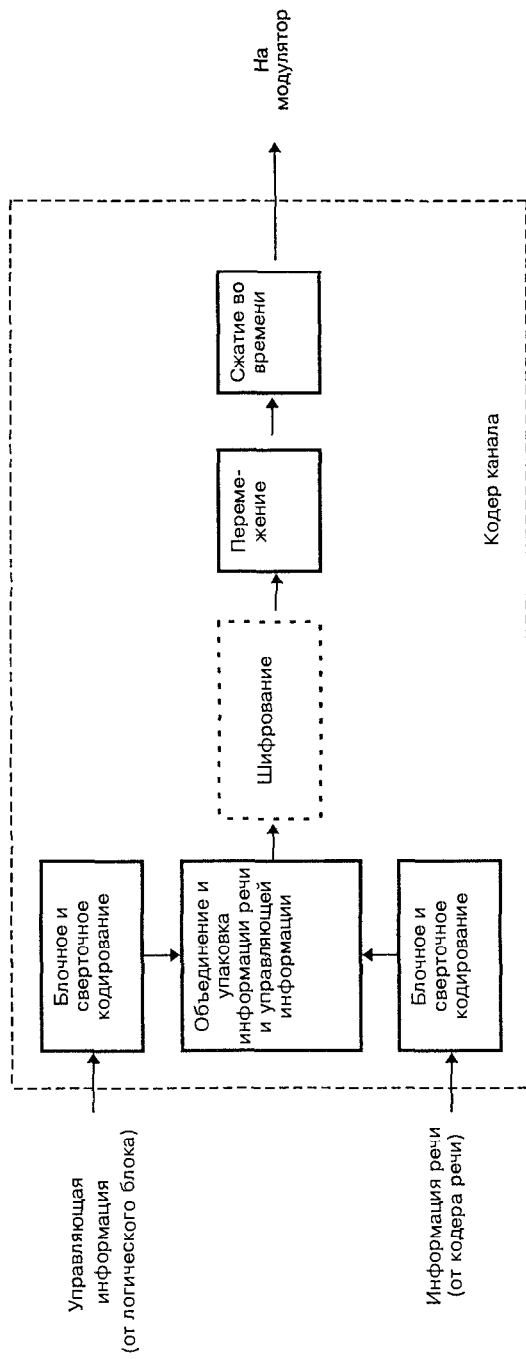


Рис 2 40 Последовательность задач, решаемых кодером канала

Начало практического применения методов помехоустойчивого кодирования в цифровых системах связи и цифровых системах памяти относится к концу 70-х – началу 80-х годов.

Дальнейшее знакомство с работой кодера канала построим следующим образом. Сначала мы в общих чертах познакомимся с блочным и сверточным кодированием и перемежением, затем рассмотрим конкретные схемы канальных кодеров стандартов D-AMPS и GSM и в заключение приведем сводку потоков информации в кодерах обоих стандартов. Вопросы шифрования информации мы коснемся в разд. 3.4.

При блочном кодировании (рис. 2.41) входная информация разделяется на блоки, содержащие по k символов каждый, которые по определенному закону преобразуются кодером в n -символьные блоки, причем $n > k$. Отношение $R = k/n$ носит наименование скорости кодирования (*coding rate*) и является мерой избыточности, вносимой кодером. При рационально построенном кодере меньшая скорость кодирования, т.е. большая избыточность, соответствует более высокой помехоустойчивости.

Повышению помехоустойчивости способствует также увеличение длины блока. Блочный кодер с параметрами n, k обозначается (n, k) . Если символы входной и выходной последовательностей являются двоичными, т.е. состоят из одного бита каждый, то кодер называется двоичным (*binary*); именно двоичные кодеры используются в сотовой связи. Схема, представленная на рис. 2.41, соответствует двоичному блочному кодеру $(5, 4)$. Каждый бит блока выходной информации получается как сумма по модулю 2 нескольких бит (от одного до k) входного блока, для чего используется n сумматоров по модулю 2. Правила двоичного суммирования по модулю 2 определяются табл. 2.9. Один из сумматоров на схеме рис. 2.41 (второй справа) является вырожденным – на его вход поступает лишь одно слагаемое.

Таблица 2.9. Алгоритм двоичного суммирования по модулю 2

Первое слагаемое	Второе слагаемое	Сумма
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

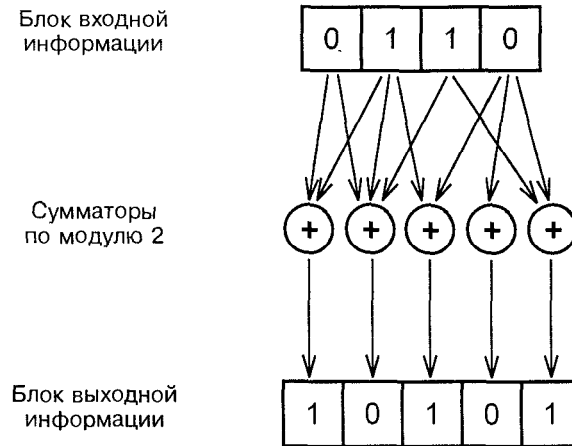


Рис. 2.41. Схема двоичного блочного кодера (5, 4)
($n = 5$, $k = 4$; $R = k/n = 4/5$)

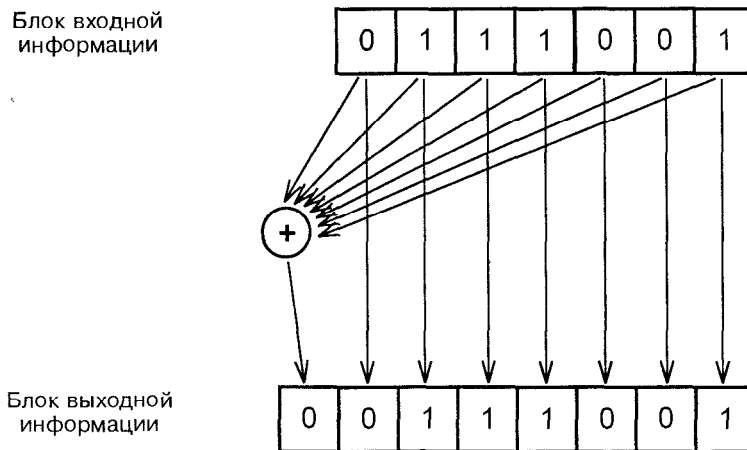


Рис. 2.42. Схема систематического двоичного блочного кодера (8, 7)

На рис. 2.42 показана схема другого блочного кодера – это так называемый *систематический* кодер. Отличительная особенность систематического кодера состоит в том, что в состав блока выходной информации включается полностью блок входной информации; тривиальные сумматоры, соответствующие формированию этой части выходного блока, на схеме не показаны. Систематический кодер рис. 2.42 – простейший: выходной блок, помимо копии входного, содержит лишь один избыточный бит, который является суммой по модулю 2 всех бит входного блока.

Этот избыточный бит называется *кодом контроля четности*, поскольку, как нетрудно убедиться, число единиц в выходном блоке, с учетом контрольного бита, оказывается четным. Для 8-битового блока двоичной информации используется наименование *байт*, и схема рис. 2.42 может быть названа схемой побайтного контроля четности. На примере этой схемы мы покажем возможность обнаружения ошибок при помощи блочного кода, а затем, несколько усложнив схему кодирования, – и возможность коррекции ошибок.

На рис. 2.43,а показаны семь блоков выходной информации кодера рис. 2.42, причем последний бит в каждом байтовом блоке, отмеченный затененным фоном, является кодом четности. Очевидно, что при наличии одиночной ошибки в любом блоке, включая и ошибку в коде четности, нарушается правило формирования кода четности, на основании чего она и обнаруживается. Однако ошибка локализуется лишь с точностью до байта, а потому не может быть исправлена, ибо неизвестно, какой именно бит в байте ошибочен. Столь же очевидно, что двойная ошибка в блоке (и вообще – ошибка в четном числе бит) этой схемой не обнаруживается.

Если, помимо контроля четности по строкам для всей приведенной информации (рис. 2.43,а), ввести еще и контроль четности по столбцам (нижняя строка на рис. 2.43,б), то при наличии одиночной ошибки в этом 64-битовом блоке мы сможем указать не только строку, содержащую ошибку, но и столбец с ошибкой, а следовательно – и ошибочный бит, лежащий на пересечении этих строки и столбца. А если известно, что бит ошибочен, то он элементарно исправляется, поскольку для этого достаточно заменить нуль на единицу или единицу на нуль – в зависимости от того, каково значение ошибочного бита. Кратные ошибки этой схемой уже не исправляются. Для коррекции кратных ошибок нужно использовать более совершенные (и более сложные) схемы кодеров. Заметим, что рис. 2.43,б соответствует систематическому двоичному блочному кодеру (64, 49), и при желании его схема без труда может быть построена по аналогии с рис. 2.42.

При сверточном кодировании (рис. 2.44) K последовательных символов входной информационной последовательности, по k бит в каждом символе, участвуют в образовании n -битовых символов выходной последовательности, $n > k$, причем на каждый символ входной последовательности приходится по одному символу выходной.

0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0

a)

0	1	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0

б)

Рис 2 43. К возможности обнаружения и коррекции ошибок при блочном кодировании:
 а – побайтовый контроль четности позволяет обнаружить одиночные ошибки в байтах,
 б – добавление еще 8 бит контроля позволяет исправить одиночную ошибку в восьми байтах

Каждый бит выходной последовательности получается как результат суммирования по модулю 2 нескольких бит (от двух до K бит) K входных символов, для чего используются n сумматоров по модулю 2. Сверточный кодер с параметрами n, k, K обозначает-

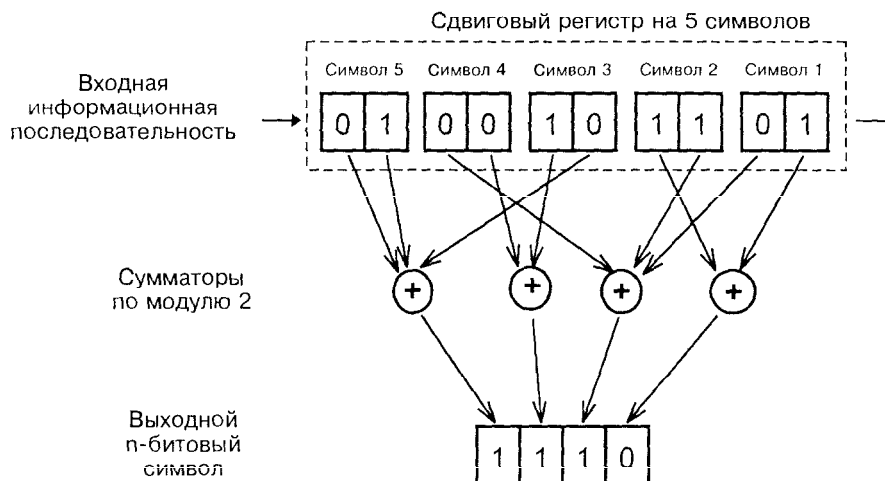


Рис. 2.44. Схема сверточного кодера (4, 2, 5)
($n = 4$, $k = 2$, $R = k/n = 1/2$)

ся (n, k, K). Отношение $R = k/n$, как и в блочном кодере, называется скоростью кодирования. Параметр K называется *длиной ограничения (constraint length)*, он определяет длину сдвигового регистра (в символах), содержимое которого участвует в формировании одного выходного символа.

После того как очередной выходной символ сформирован, входная последовательность сдвигается на один символ вправо (рис. 2.44), в результате чего символ 1 выходит за пределы регистра, символы 2...5 перемещаются вправо, каждый на место соседнего, а на освободившееся место записывается очередной символ входной последовательности, и по новому содержимому регистра формируется следующий выходной символ. Название сверточного кода обязано тому, что он может рассматриваться как свертка импульсной характеристики кодера и входной информационной последовательности. Если $k = 1$, т.е. символы входной последовательности однобитовые, сверточный кодер называется двоичным. Сверточный кодер, схема которого приведена на рис. 2.44, не является двоичным, поскольку для него $k = 2$.

Перемежение представляет собой такое изменение порядка следования символов информационной последовательности, т.е. такую перестановку, или перетасовку, символов, при которой стоявшие рядом символы оказываются разделенными несколькими другими символами. Такая процедура предпринимается с целью преобразования групповых ошибок (пакетов ошибок) в одиночные

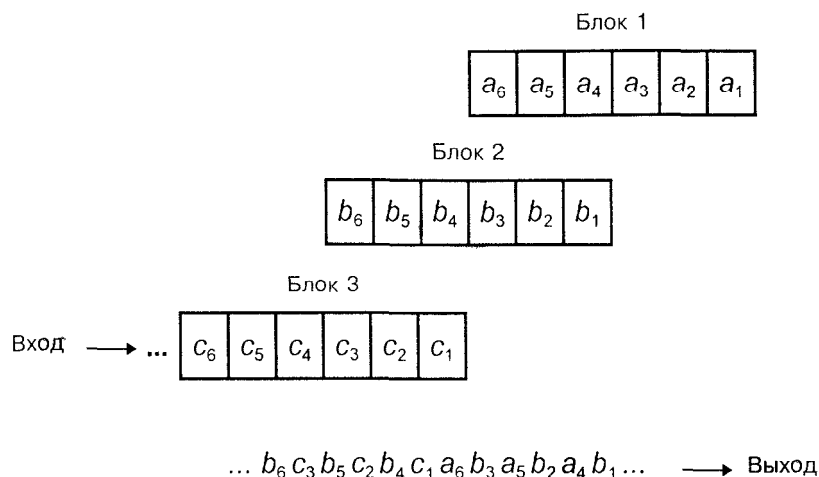


Рис 2.45 Пример схемы диагонального перемежения

ошибки, с которыми легче бороться с помощью блочного и сверточного кодирования. Использование перемежения – одна из характерных особенностей сотовой связи, и это является следствием неизбежных глубоких замираний сигнала в условиях многолучевого распространения, которое практически всегда имеет место, особенно в условиях плотной городской застройки. При этом группа следующих один за другим символов, попадающих на интервал замирания (провала) сигнала, с большой вероятностью оказывается ошибочной. Если же перед выдачей информационной последовательности в радиоканал она подвергается процедуре перемежения, а на приемном конце восстанавливается прежний порядок следования символов, то пакеты ошибок с большой вероятностью рассыпаются на одиночные ошибки. Известно несколько различных схем перемежения и их модификаций – диагональная, блочная, сверточная и другие. Мы кратко рассмотрим первые две из них, лежащие в основе схем, применяемых в сотовой связи.

При диагональном перемежении входная информация делится на блоки, а блоки – на субблоки, и в выходной последовательности субблоки, например, второй половины предыдущего блока чередуются с субблоками первой половины следующего блока. Такая схема иллюстрируется рис. 2.45, где каждый блок состоит из шести субблоков, и субблоки первого блока обозначены a_i , второго – b_i , третьего – c_i . Субблок может состоять из нескольких символов, или из одного символа, или даже из одного бита. Приве-

денная схема диагонального перемежения вносит малую задержку, но расставляет соседние символы лишь через один, т.е. рассредоточение ошибочных символов группы получается сравнительно небольшим.

При блочном перемежении входная информация также делится на блоки, по n субблоков (или символов) в каждом, и в выходной последовательности чередуются субблоки k последовательных блоков. Работу этой схемы можно представить себе в виде записи блоков входной последовательности в качестве строк матрицы размерности $k \times n$ (рис. 2.4б), считывание информации из которой производится по столбцам. Следовательно, если входная последовательность в этом примере имела вид $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n, \dots, k_1, k_2, \dots, k_n$, то выходная будет такой: $a_1, b_1, \dots, k_1, a_2, b_2, \dots, k_2, \dots, a_n, b_n, \dots, k_n$. Субблоки, или символы, в частном случае здесь также могут состоять лишь из одного бита. Схема блочного перемежения вносит большую задержку, чем диагонального, но значительно сильнее рассредоточивает символы группы ошибок.

Общим недостатком обеих рассмотренных схем является жесткая периодичность следования переставленных символов в пределах интервала перемежения. Этот недостаток также может быть устранен, но за счет применения более сложной схемы перемежения.

Перейдем к конкретным канальным кодерам стандартов D-AMPS и GSM, придерживаясь блок-схемы рис. 2.40.

В стандарте D-AMPS 159 бит информации, кодирующих параметры 20-миллисекундного сегмента речи (разд. 2.4.4.3, табл. 2.6), разделяются на два класса: информация класса 1, к которой относятся 77 бит из 159, подвергается помехоустойчивому кодированию; информация класса 2, к которой относятся оставшиеся 82 бита, передается без блочного или сверточного кодирования

К классу 1 относятся:

- 4 бита из 5 амплитудного множителя ρ ;
- 4 бита из 6 первого коэффициента частной корреляции k_1 ;
- по 3 бита из 5 для коэффициентов k_2 и k_3 ;
- 2 бита из 4 для коэффициента k_4 ;
- 1 бит из 4 для коэффициента k_5 ;
- все 7 бит для каждой из четырех задержек d фильтра долговременного предсказания;
- все 8 бит для каждой из четырех комбинаций, кодирующих коэффициенты усиления g, γ_1, γ_2 .

Кроме того, из 77 бит класса 1 выделяются 12 бит, субъективно наиболее значимых для передачи речи:

- 3 бита из амплитудного множителя ρ ;
- 3 бита из коэффициента k_1 ;
- по 2 бита из коэффициентов k_2 и k_3 ;
- по 1 биту из коэффициентов k_4 и k_5 .

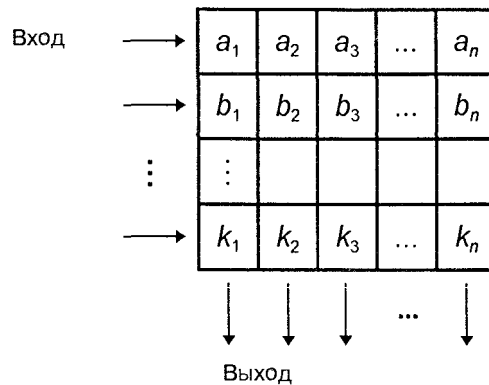


Рис. 2.46. Схема блочного перемежения

Для этих 12 бит вычисляется 7-битовый код циклического контроля избыточности (CRC – *Cyclic Redundancy Check*), или просто код четности (*parity code*), который дополняется пятью нулями, и полученные 12 бит присоединяются к 77 битам класса 1.

Полученные 89 бит информации подвергаются двоичному сверточному кодированию со скоростью $R = 1/2$ и длиной ограничения $K = 5$, давая на выходе кодера свертки 178 бит. Вместе с 82 битами класса 2 это составляет 260 бит, что по объему соответствует одному слоту канала трафика (рис. 2.9). Таким образом, поток информации речи на выходе кодера канала составляет 260 бит/20 мс, или 13 кбит/с.

При декодировании информации речи прежде всего производится сверточное декодирование 89 бит информации класса 1 и кода четности с коррекцией ошибок в пределах возможностей кода свертки. Затем производится контроль правильности 12 наиболее значимых бит, для чего по этим 12 битам из состава принятой информации вновь вычисляется 7-битовый код четности, который сравнивается с принятым кодом четности.

При совпадении обоих кодов информация речи подвергается последующей обработке.

При несовпадении логика обработки зависит от числа несовпадений подряд.

При первом или втором (подряд) несовпадении параметры p и k , принятого сообщения заменяются соответствующими параметрами из последнего сообщения, в котором не было ошибки кода четности, и дальнейшая обработка производится обычным порядком.

При третьем, четвертом и пятом подряд несовпадениях в дополнение к этому множитель p уменьшается соответственно на 4,

8 или 12 дБ. При шести и более несовпадениях подряд множитель ρ устанавливается равным нулю, т.е. принятый сигнал речи заглушается, и для возврата к нормальной обработке требуется двукратное выполнение контроля четности.

Информация канала FACCH, передаваемая вместо информации речи в поле Data (рис. 2.9), подвергается блочному и сверточному кодированию в полном объеме. Сообщение канала FACCH передается словами по 49 бит, из которых 1 бит – флажок продолжения, и 48 бит – собственно данные сообщения. Число слов в сообщении не ограничивается. Сначала для 49-битового слова вместе с предшествующим ему 8-битовым кодом DVCC вычисляется 16-битовый код циклического контроля избыточности (код четности), который добавляется к 49 битам слова канала FACCH, образуя 65 бит. Далее это 65-битовое слово подвергается двоичному сверточному кодированию со скоростью $R = 1/4$ и длиной ограничения $K = 6$; результирующие 260 бит заполняют два 130-битовых поля Data одного слота (рис. 2.9). При этом в слоте нет никакого флажка, помечающего замену информации речи информацией управления канала FACCH. Поэтому при декодировании сначала предпринимается попытка декодировать содержимое поля Data как информацию речи, а при неудаче – попытка декодировать его как информацию канала FACCH. Если в последнем случае обнаруживается ошибка в коде четности, это означает наличие ошибки в декодированной информации управления, и она не принимается к исполнению.

Информация канала SACCH, передаваемая в соответствующем поле слота канала трафика (рис. 2.9), также подвергается блочному и сверточному кодированию – в значительной мере аналогично информации канала FACCH. Сообщения канала SACCH передаются словами по 50 бит, из которых 1 бит – флажок продолжения, 1 бит – резервный (нуль) и 48 бит – данные сообщения. Эти 50 бит дополняются 16-битовым кодом четности, вычисляемым так же, как и для информации канала FACCH, и результирующее 66-битовое слово подвергается двоичному сверточному кодированию со скоростью $R = 1/2$ и длиной ограничения $K = 5$. Результирующие 132 бита распределяются (с учетом перемежения, о чем мы скажем чуть ниже) по 12-битовым полям SACCH 22 последовательных слотов канала трафика. Передаваемая информация речи, а также управляющая информация каналов FACCH и SACCH, подвергается перемежению.

Для информации речи и информации канала FACCH используется общая схема перемежения, которая может быть названа блочно-диагональной. В схеме перемежения участвует информация двух смежных 20-миллисекундных сегментов. Входная информация схемы перемежения записывается побитно по строкам в матрицу типа показанной на рис. 2.4б, с числом строк $k = 10$ и числом столбцов $n = 26$, причем четные столбцы берутся из текущего, а нечетные – из предыдущего; выдача информации производится по столбцам. При приеме схема деперемежения

восстанавливает исходный порядок следования информации. Для информации канала SACCH используется схема диагонального перемежения типа показанной на рис. 2.45, но с битовым чередованием информации в пределах не двух, а двенадцати последовательных блоков и со сдвигом последовательных 12-битовых блоков не на половину блока, а на один бит. После объединения информации речи (или заменяющей ее информации канала FACCH) и управляющей информации, включая защитные бланки и т.п. (рис. 2.9), объем информации, передаваемой за 20-миллисекундный сегмент, возрастает до 324 бит, т.е. результирующий поток информации составляет 16,2 кбит/с. Далее эта информация сжимается во времени втрое, с тем чтобы на протяжении 40-миллисекундного кадра могла быть передана информация шести слотов (рис. 2.9). В результате частота информационной битовой последовательности на выходе кодера канала составляет 48,6 кбит/с.

В стандарте GSM 260 бит информации, кодирующих параметры 20-миллисекундного сегмента речи (подразд. 2.4.4.3, табл. 2.7), также разделяются на два класса: класс 1 – 182 бита, защищаемые помехоустойчивым кодированием, и класс 2 – оставшиеся 78 бит, которые передаются без помехоустойчивого кодирования. В свою очередь, из 182 бит класса 1 выделяются 50 наиболее существенных бит, составляющих подкласс 1а, которые подвергаются более мощному кодированию, а остальные 132 бита класса 1 составляют подкласс 1б и кодируются слабее. К подклассу 1а относятся параметры фильтра кратковременного предсказания и часть информации о параметрах фильтра долговременного предсказания, к подклассу 1б – часть информации о параметрах сигнала возбуждения и оставшаяся информация о параметрах фильтра долговременного предсказания, к классу 2 – оставшаяся информация о параметрах сигнала возбуждения.

Информация подкласса 1а кодируется блочным кодом, обнаруживающим ошибки, – укороченным систематическим циклическим кодом (53, 50), дающим 3-битовый код четности. Затем вся информация класса 1 переупаковывается, располагаясь в такой последовательности: биты с четными индексами, код четности подкласса 1а, биты с нечетными индексами в обратной последовательности, четыре добавочных нулевых бита – всего 189 бит. Эти 189 бит подаются на сверточный кодер (2, 1, 5) со скоростью кодирования $R = 1/2$ и длиной ограничения $K = 5$. В результате 378 бит с выхода сверточного кодера вместе с 78 битами класса 2 составляют 456 бит, т.е. поток информации речи на выходе кодера речи равен 456 бит/20 мс, или 22,8 кбит/с. При декодировании информации речи также сначала выполняется сверточное декодирование информации класса 1, и при этом исправляются ошибки в пределах возможностей кода свертки. Затем по коду четности проверяется наличие остаточных ошибок в информации подкласса 1а, и, если такие ошибки обнаруживаются, информация данного сегмента не идет в последующую обработку, а заменяется интерполированной информацией смежных сегментов.

Перед выдачей в канал связи закодированная информация речи также подвергается перемежению. В стандарте GSM используется достаточно сложная и совершенная схема блочно-диагонального перемежения. 456 бит информации одного 20-миллисекундного сегмента речи разбиваются на 8 подсегментов, и 57 бит одного подсегмента распределяются между смежными восемью подсегментами таким образом, что после перемежения смежными с каждым конкретным битом оказываются соответствующие ему по положению биты, отстоявшие от него до перестановки на 4 подсегмента, причем на четные и нечетные (после перестановки) битовые позиции подсегмента ставятся биты из смежных сегментов. Алгоритм перемежения обладает свойствами квазислучайности, так что смежные биты исходной последовательности оказываются разделенными непостоянным числом бит, что является преимуществом в борьбе с периодическими битовыми ошибками.

После перемежения 456 бит информации одного сегмента распределяются по одноименным слотам четырех последовательных кадров канала трафика – два поля по 57 бит в слоте (рис. 2.11), и каждое 57-битовое поле снабжается дополнительным скрытым флажком, помечающим информацию речи (в отличие от информации управления канала FACCH, которая кодируется существенно иначе).

Информация каналов управления подвергается блочному и сверточному кодированию в полном объеме. Так, для кодирования информации каналов SACCH, FACCH, FACH, PCN, AGCH, SDCCN используется блочный кодер (224, 184), сверточный кодер (2, 1, 5), и та же схема перемежения, что и для канала трафика. В каналах RACH, SCH используются другие схемы блочного кодирования, а также сверточные кодеры (2, 1, 5), отличающиеся от сверточных кодеров перечисленных ранее каналов управления. При передаче данных используются более сложные схемы сверточного кодирования и перемежения, обеспечивающие соответственно и более высокое качество передачи информации.

Длительность слота канала трафика, с учетом добавления вспомогательной и служебной информации (рис. 2.11), составляет 156,25 бит, и, поскольку информация одного 20-миллисекундного сегмента речи занимает по одному слоту в четырех последовательных кадрах, результирующий поток информации составляет 625 бит/20 мс, или 31,25 кбит/с. Эта информация сжимается во времени в 8 раз, так что на протяжении одного кадра длительностью 4,615 мс передается информация восьми временных слотов (рис. 2.10), в результате чего частота битовой последовательности возрастает до 250 кбит/с.

Наконец, на каждые 12 кадров канала трафика, несущих информацию речи, добавляется по одному кадру с информацией управления канала SACCH (кадры 13 и 26 мультикадра канала трафика на рис. 2.11). Таким образом, частота информационной битовой последовательности на выходе кодера канала составляет 270,833 кбит/с.

Для наглядности основные характеристики систем кодирования речи стандартов D-AMPS и GSM представлены в виде сводки табл. 2.10. В последней строке таблицы дана эффективность использования полосы частот, характеризуемая частотой битовой последовательности на выходе кодера канала, приходящейся на 1 Гц полосы, занимаемой частотным каналом.

Таблица 2.10. Сводка основных характеристик систем кодирования речи стандартов D-AMPS и GSM

Характеристика	D-AMPS	GSM
Метод кодирования	VSELP	RPE-LTP
Длительность кодируемого сегмента речи, мс	20	20
Частота битовой последовательности на входе кодера речи, кбит/с	64	64
Частота битовой последовательности на выходе кодера речи, кбит/с	7,95	13
Дополнительный поток информации для защиты от ошибок (блочное и сверточное кодирование), кбит/с	5,05	9,8
Дополнительный поток управляющей и служебной информации (до сжатия TDMA), кбит/с	3,2	8,45
Коэффициент сжатия (для реализации TDMA)	3	8
Дополнительный поток управляющей информации (после сжатия TDMA), кбит/с	-	20,833
Скорость передачи информации в канале (частота битовой последовательности на выходе кодера канала), кбит/с	48,6	270,833
Полоса канала, кГц	30	200
Эффективность использования полосы частот, бит/с/Гц	1,62	1,35

2.4.4.5. Модуляция

Модулятор является последним элементом передающего тракта (рис. 2.6) и, строго говоря, не выполняет никаких операций собственно цифровой обработки сигналов. Его задача состоит в переносе информации цифрового сигнала с выхода кодера канала на несущую частоту, т.е. в модуляции сверхвысокочастотной (СВЧ) несущей низкочастотным (НЧ) цифровым видеосигналом. Модулированный СВЧ сигнал с выхода модулятора через антенный коммутатор поступает на антенну и излучается в эфир, чтобы быть затем принятым антенной станции-получателя информации. Соответственно демодулятор – первый элемент приемного тракта, и его задача заключается в выделении из принятого модулированного радиосигнала информационного видеосигнала, который подвергается цифровой обработке в последующей части приемного тракта.

Как известно, существуют три основных вида модуляции: это амплитудная модуляция – АМ (английский термин *Amplitude Modulation* – АМ), частотная модуляция – ЧМ (*Frequency Modulation* – FM) и фазовая модуляция – ФМ (*Phase Modulation* – PM). Между тем в цифровой сотовой связи фигурируют такие названия, как квадратурная фазовая манипуляция (*Quadrature Phase Shift Keying* – QPSK), минимальная манипуляция (*Minimum Shift Keying* – MSK) и т.п. На самом деле это не что иное, как разновидности фазовой или частотной модуляции, предназначенные для передачи дискретных (цифровых) сигналов, и английский термин *shift keying*, переводимый обычно как манипуляция, в буквальном переводе означает переключение сдвигом или переключение скачком, т.е. дискретное переключение. Дискретная модуляция (модуляция дискретными сигналами) имеет свою специфику и во многом отличается от более привычной для многих радиоинженеров модуляции непрерывными сигналами. В применении к цифровой сотовой связи в качестве обязательных требований для используемых методов модуляции обычно указывают высокую спектральную эффективность, низкий уровень помех по смежным частотным каналам, низкую частоту битовой ошибки (Bit Error Rate – BER), экономичность (эффективность использования энергии источника питания, что особенно актуально для подвижной станции), простоту реализации. Мы не будем, однако, ни систематически излагать принципы дискретной модуляции и сравнительные характеристики различных методов, ни приводить обоснования по выбору методов для практического применения, а рассмотрим сразу конкретные методы модуляции, используемые в стандартах D-AMPS и GSM, с минимально необходимыми пояснениями.

В стандарте D-AMPS используется дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом $\pi/4$ ($\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying – $\pi/4$ DQPSK). По сути это – дискретная фазовая модуляция, с основным дискретом коммутации

фазы $\pi/2$ (как при обычной квадратурной фазовой манипуляции), но с дополнительным сдвигом по фазе на $\pi/4$ при переходе от символа к символу входной модулирующей последовательности импульсов. Слово *дифференциальная* в названии метода означает, что очередное изменение фазы отсчитывается не по отношению к фазе некоторого опорного сигнала, а по отношению к фазе предыдущего дискрета.

При объяснении метода $\pi/4$ DQPSK часто предварительно описывают методы бинарной фазовой манипуляции (Binary Phase Shift Keying – BPSK), т.е. фазовой манипуляции с дискретом π , и квадратурной фазовой манипуляции (Quadrature Phase Shift Keying – QPSK) – фазовой манипуляции с дискретом $\pi/2$, а также метод квадратурной фазовой манипуляции со смещением (Offset Quadrature Phase Shift Keying – OQPSK). Ограничимся приведенным выше перечислением названий и перейдем непосредственно к методу $\pi/4$ DQPSK.

В этом методе все импульсы входной информационной последовательности b_k модулятора разбиваются на пары – на 2-битовые символы, и при переходе от символа к символу начальная фаза СВЧ сигнала изменяется на величину $\Delta\varphi$, которая определяется битами символа в соответствии с алгоритмом, приведенным в табл. 2.11.

Таблица 2.11. Закон фазовой манипуляции метода $\pi/4$ DQPSK

Биты входной последовательности модулятора		Изменение фазы $\Delta\varphi_k = \Delta\varphi_k(X_k, Y_k)$
нечетные (первые биты символа) X_k	четные (вторые биты символа) Y_k	
1	1	$-3\pi/4$
0	1	$3\pi/4$
0	0	$\pi/4$
1	0	$-\pi/4$

Фазовая диаграмма, соответствующая этому методу, представлена на рис. 2.47. Кружочками обозначены дискретные значения, которые может принимать фаза несущей, отсчитываемая от некоторого начального значения. Стрелками указаны возможные переходы между разрешенными значениями фазы. Оси координат соответствуют синфазной (Inphase – I) и квадратурной (Quadrature – Q) составляющим сигнала. Эта фазовая диаграмма состоит фактически из двух диаграмм обычной квадратурной фазовой манипуляции: фазовые состояния одной из них помечены значком \oplus , а

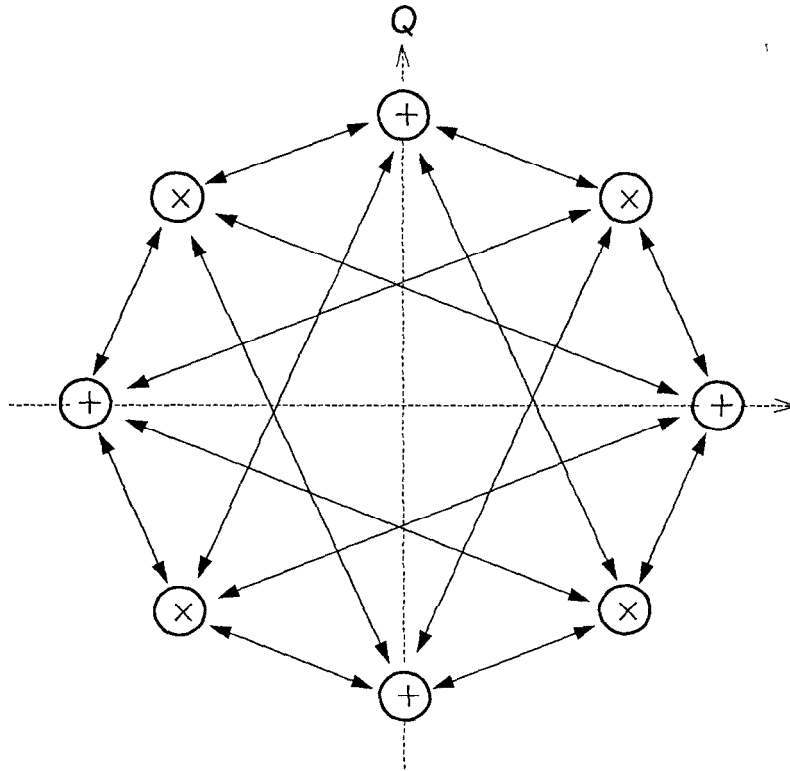


Рис.2.47. Фазовая диаграмма (фазовое созвездие – *phase constellation*), соответствующая методу $p/4$ DQPSK

другой – значком \otimes , и диаграммы сдвинуты одна относительно другой на угол $\pi/4$. При переходе от одного символа к другому происходит изменение фазы от одного из состояний первой диаграммы к одному из состояний второй, а при переходе к следующему символу – возврат к предыдущей диаграмме, хотя скорее всего не к прежнему фазовому состоянию. Результирующий выходной сигнал модулятора (без учета сравнительно тонких эффектов, типа ограниченности полосы пропускания частотно-селективных элементов тракта) может быть представлен в виде

$$s(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi_k),$$

где ω_0 – несущая частота, $\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k$ – начальная фаза на интервале k -го символа.

Описанному выше модулятору $\pi/4$ DQPSK соответствует блок-схема, приведенная на рис. 2.48. Пожалуй, единственное пояснение, которое может быть сделано к этой схеме, относится к работе блока дифференциального кодирования фазы. Последний осуществляет формирование амплитуд I_k, Q_k квадратурных составляющих очередного дискрета (символа) модулированного сигнала в соответствии с алгоритмом

$$\begin{aligned} I_k &= \cos \varphi_k = \cos(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k) = \cos \varphi_{k-1} \cos \Delta\varphi_k - \sin \varphi_{k-1} \sin \Delta\varphi_k \\ &= I_{k-1} \cos[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] - Q_{k-1} \sin[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)], \\ Q_k &= \sin \varphi_k = \sin(\varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k) = \sin \varphi_{k-1} \cos \Delta\varphi_k + \cos \varphi_{k-1} \sin \Delta\varphi_k \\ &= Q_{k-1} \cos[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)] + I_{k-1} \sin[\Delta\varphi_k(X_k, Y_k)], \end{aligned}$$

где приращение фазы $\Delta\varphi_k$ определяется табл. 2.11. Выполнение вычислений упрощается тем, что каждая из величин $\cos\Delta\varphi_k, \sin\Delta\varphi_k, I_k, Q_k$ может принимать в соответствии с рис. 2.44 лишь одно из пяти дискретных значений: $0, \pm\sqrt{2}/2, \pm 1$. Сумма модулированных квадратурных составляющих дает окончательный выходной сигнал:

$$I_k \cos \omega_0 t + Q_k \sin \omega_0 t = \cos \varphi_k \cos \omega_0 t + \sin \varphi_k \sin \omega_0 t = \cos(\omega_0 t + \varphi_k) = s(t).$$

Заметим, что приведенная схема – лишь иллюстрация принципа работы модулятора, а вариантов ее практической реализации, как говорят, существует по меньшей мере столько же, сколько радиоинженеров на свете.

В стандарте GSM используется гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом (*Gaussian Minimum Shift Keying – GMSK*). Этот метод представляет собой частотную манипуляцию, при которой несущая частота дискретно – через интервалы времени, кратные периоду T битовой модулирующей последовательности, – принимает значения

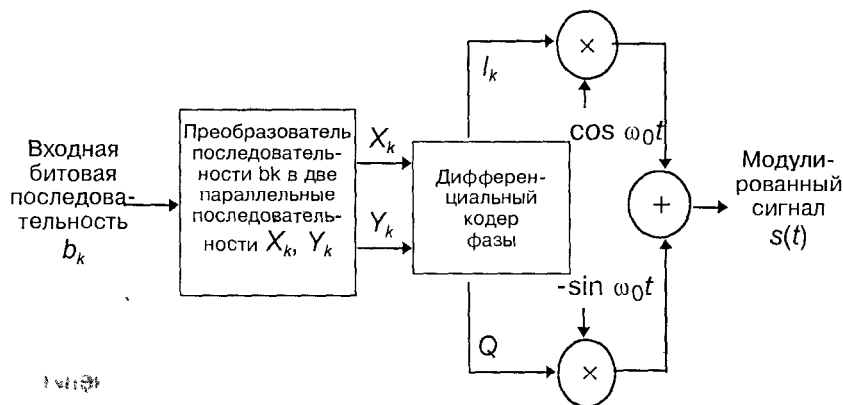
$$f_H = f_0 - F/4$$

или

$$f_B = f_0 + F/4,$$

где f_0 – центральная частота используемого частотного канала, а $F = 1/T$ – частота битовой последовательности.

Разнос частот $\Delta f = f_B - f_H = F/2$ – минимально возможный, при котором обеспечивается ортогональность колебаний частот f_H и f_B на интервале T длительности одного бита; при этом за время T между колебаниями частот f_H и f_B набегает разность фаз, равная π . Таким образом, термин “минимальный сдвиг” в названии метода модуляции относится, в указанном выше смысле, к сдвигу частоты. Поскольку модулирующая частота в этом случае равна $F/2$, а деви-

Рис. 2.48. Блок-схема модулятора $\pi/4$ DQPSK

ация частоты $F/4$, индекс частотной модуляции составляет $m = (F/4)/(F/2) = 0,5$.

Термин «гауссовская» в названии метода модуляции соответствует дополнительной фильтрации модулирующей битовой последовательности относительно узкополосным гауссовским фильтром; именно эта дополнительная фильтрация отличает метод GMSK от метода MSK (Minimum Shift Keying – манипуляция с минимальным сдвигом).

Метод MSK иногда рассматривают как метод квадратурной фазовой манипуляции со смещением (OQPSK), но с заменой прямоугольных модулирующих импульсов длительности $2T$ полуволновыми отрезками синусоид или косинусоид. Ниже мы поясним, в чем заключаются основания для такой интерпретации. Рассмотрим сначала метод MSK, а потом отметим, к каким отличиям приводит дополнительная гауссовская фильтрация.

В методе MSK входная последовательность битовых импульсов модулятора разбивается на две последовательности, состоящие соответственно из нечетных и четных импульсов, и модулированный сигнал (выходной сигнал модулятора) на протяжении очередного n -го бита определяется выражением, зависящим от состояния текущего n -го и предшествующего $(n - 1)$ -го бита:

$$\begin{aligned}
 s(t) &= \pm \cos(\pi t / 2T) \cos \omega_0 t \pm \sin(\pi t / 2T) \sin \omega_0 t = \\
 &= \pm \cos(\omega_0 t \pm \pi t / 2T), \quad (n - 1)T \leq t \leq nT.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Здесь $\omega_0 = 2\pi f_0$ – центральная частота канала, а выбор знаков «плюс» или «минус» перед соответствующими членами выражения определяется алгоритмом, приведенным в табл. 2.12.

Таблица 2.12. Закон модуляции метода MSK

Биты входной последовательности модулятора		Знаки в первом представлении (2.1)		Знаки во втором представлении (2.1)		Значение несущей частоты
нечетный бит	четный бит	знак первого слагаемого (cos)	знак второго слагаемого (sin)	общий знак выражения (cos)	знак начальной фазы ($\pi t/2T$)	
1	1	+	+	+	-	f_H
0	1	+	-	+	+	f_B
0	0	-	-	-	-	f_H
1	0	-	+	-	+	f_B

Подчеркнем, что два бита, используемые в качестве аргументов закона модуляции (два первых столбца в табл. 2.11), выбираются с учетом того, какой бит является текущим: если текущий бит четный, то вторым битом пары является предшествующий ему нечетный; если же текущий бит нечетный, то второй бит пары – предшествующий ему четный.

Из выражения (2.1) следует, что текущая фаза модулированного сигнала

$$\varphi(t) = \omega_0 t \pm \pi t / 2T ,$$

т.е. набег фазы на интервале T одного бита

$$\Delta\varphi = \pm\pi / 2 ,$$

а мгновенная частота, как производная от фазы

$$\omega(t) = d[\varphi(t)] / dt = \omega_0 \pm \pi / 2T = 2\pi(f_0 \pm F / 4) ,$$

т.е. мгновенная частота принимает одно из двух значений – f_B или f_H , постоянное на протяжении бита, что и указано в последнем столбце табл. 2.12.

Таким образом, изменение знака начальной фазы во второй части выражения (2.1) означает переход от f_H к f_B или обратно. Изменение же общего знака выражения (2.1), эквивалентное изменению начальной фазы на π , позволяет сохранить непрерывность фазы при изменении частоты.

Приведем еще одно пояснение метода MSK, которое, возможно, будет более наглядным, для чего обратимся к рис.2.49. На первом графике рис.2.49 представлен пример входной битовой последовательности а модулятора.

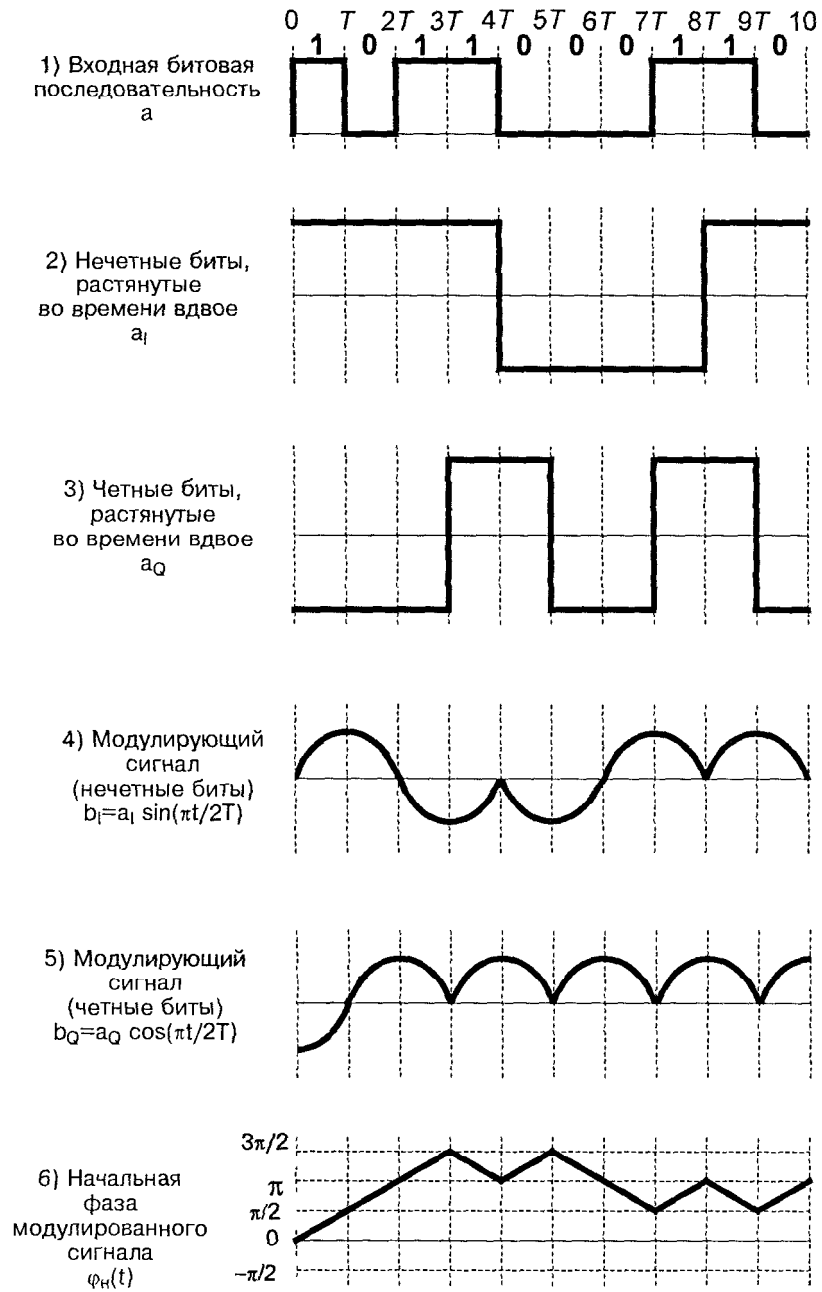


Рис. 2.49. Временные диаграммы сигналов в методе MSK

Второй и третий графики дают соответственно последовательности нечетных a_i и четных a_Q бит входной последовательности, причем длительность каждого бита увеличена вдвое в сторону запаздывания, т.е. каждый бит «растянут» во времени до 2-битового символа, и для удобства последующих рассуждений принято, что последовательности a_i и a_Q принимают значения +1 и -1 (значение -1 соответствует значению 0 исходной последовательности a).

В результате для каждого битового интервала длительностью T расположенные одно над другим значения a_i и a_Q дают как раз ту пару четного и нечетного бит, которые являются аргументами закона модуляции (табл. 2.12).

Четвертый и пятый графики рис. 2.49 показывают форму модулирующих сигналов двух квадратурных каналов b_i и b_Q , получаемых как произведения функций a_i и a_Q соответственно на квадратурные низкочастотные сигналы $\sin(\pi t/2T)$ и $\cos(\pi t/2T)$. Обратим внимание на скачкообразные изменения фазы этих сигналов на π в моменты изменений знаков a_i , a_Q .

Окончательный модулированный сигнал согласно первой части выражения (2.1) получается как результат перемножения модулирующих сигналов квадратурных каналов с соответствующими несущими $\sin(\omega_0 t)$ и $\cos(\omega_0 t)$ и суммирования полученных произведений. Описанный принцип построения модулятора MSK поясняется блок-схемой рис. 2.50 (пока без учета первого блока – гауссовского фильтра G). Подчеркнем, что эта схема также служит лишь для иллюстрации принципа работы модулятора. Сочетание рис. 2.49 и 2.50 вместе с сопутствующими им комментариями являются и обещанным ранее пояснением, почему метод MSK можно интерпретировать как метод OQPSK с синусоидальными модулирующими импульсами.

Из приведенных выше аналитических выражений непосредственно следует, что начальная фаза φ_n модулированного сигнала в методе MSK описывается линейно-ломаной кривой (график б на рис. 2.49), т.е. зависимость $\varphi_n(t)$ является непрерывной, но не гладкой. Добавление гауссовского фильтра, т.е. фильтра низких частот с амплитудно-частотной характеристикой в форме гауссовской кривой (блок G на рис 2.50), приводит к сглаживанию кривой $\varphi_n(t)$ в точках излома. Ширина полосы B фильтра по уровню 3 дБ выбирается равной

$$B = 0,3F,$$

т.е. произведение

$$BT = 0,3,$$

где T и F , как и ранее, – соответственно период и частота битовой модулирующей последовательности.

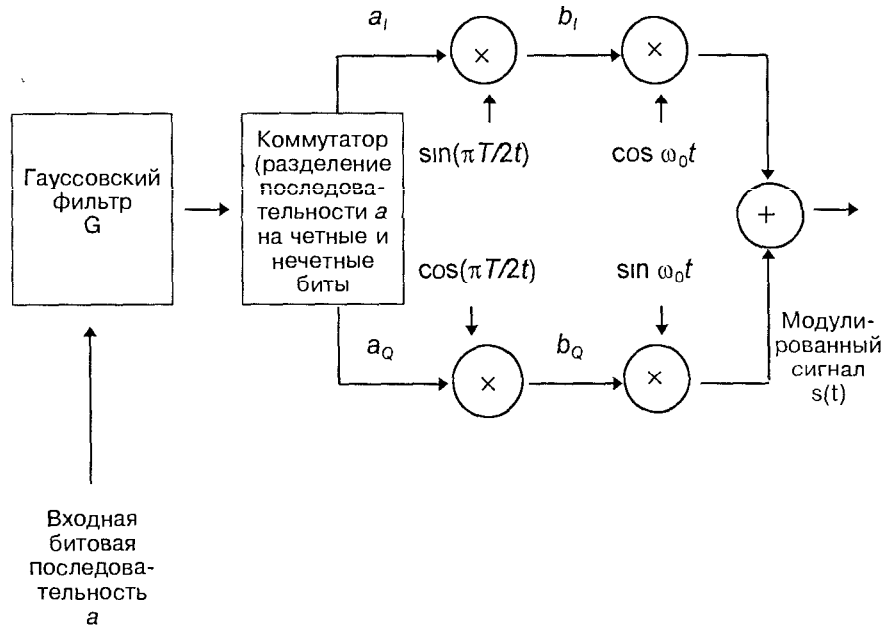


Рис. 2.50. Блок-схема модулятора GMSK

Поскольку в стандарте GSM $F = 270,833$ кГц, полоса гауссовского фильтра равна $B = 81,3$ кГц.

Введение гауссовского фильтра приводит к сужению главного лепестка и снижению боковых лепестков спектра на выходе модулятора, чем обеспечивается допустимый уровень помех по смежным частотным каналам.

В заключение раздела отметим, что методы модуляции $\pi/4$ DQPSK и GMSK оказываются сопоставимыми по частоте битовой ошибки (BER) [161], хотя первый из них обеспечивает несколько более высокую эффективность использования полосы частот в расчете на 1 бит передаваемой информации (последняя строка в табл. 2.10). Упомянем также, что метод модуляции $\pi/4$ DQPSK используется в японском цифровом стандарте сотовой связи PDC, а метод GMSK – в стандарте DECT беспроводного телефона, но при $BT = 0,5$.

2.4.5. Борьба с влиянием многолучевого распространения

2.4.5.1. Многолучевое распространение и его проявления

Мы уже отмечали ранее (разд. 2.4.1), что используемые в сотовой связи дециметровые радиоволны слабо огибают препятствия, т.е. распространяются в основном по прямой, но испытывают многочисленные отражения от окружающих объектов и подстилающей поверхности. Одним из следствий такого многолучевого распространения является более быстрое, чем в свободном пространстве, убывание интенсивности принимаемого сигнала с расстоянием. Другое следствие – замирания и искажения результирующего сигнала. Именно эти эффекты мы и рассмотрим несколько подробнее.

Картина многолучевого распространения схематически иллюстрируется рис. 2.51. Фактически область существенных отражений ограничивается обычно сравнительно небольшим участком в окрестности подвижной станции – порядка нескольких сотен длин волн, т.е. порядка нескольких десятков или сотен метров. При движении подвижной станции эта область перемещается вместе с ней таким образом, что подвижная станция все время остается вблизи центра области. При сложении нескольких сигналов, прошедших по разным путям и имеющих в точке приема в общем случае различные фазы, результирующий сигнал может быть как несколько выше среднего уровня, так и заметно ниже, причем провалы, или замирания сигнала, образующиеся при взаимной компенсации сигналов вследствие неблагоприятного сочетания их фаз и амплитуд, могут быть достаточно глубокими. Искажения результирующего сигнала, или межсимвольная интерференция, имеет место в том случае, когда более или менее синфазные составляющие сигналы с соизмеримыми амплитудами настолько отличаются по разности хода, что символы одного сигнала «налезают» на соседние символы другого.

Колебания уровня (замирания) принимаемого сигнала практически всегда имеют две составляющие – быструю и медленную. *Быстрые* замирания, являющиеся прямым следствием многолучевого распространения, описываются релейевским законом распределения, и потому их иногда называют *релейевскими* замираниями. Диапазон изменений уровня сигнала при быстрых замираниях может достигать 40 дБ, из которых примерно 10 дБ – превышение над средним уровнем и 30 дБ – провалы ниже среднего уровня, причем более глубокие провалы встречаются реже, чем менее глубокие. При неподвижном абонентском аппарате интенсивность принимаемого сигнала, естественно, не меняется. При перемещении подвижной станции периодичность флуктуаций в пространстве составляет около полуволны, т.е. порядка 10...15 см в линейной мере. Период флуктуаций во времени зависит от ско-

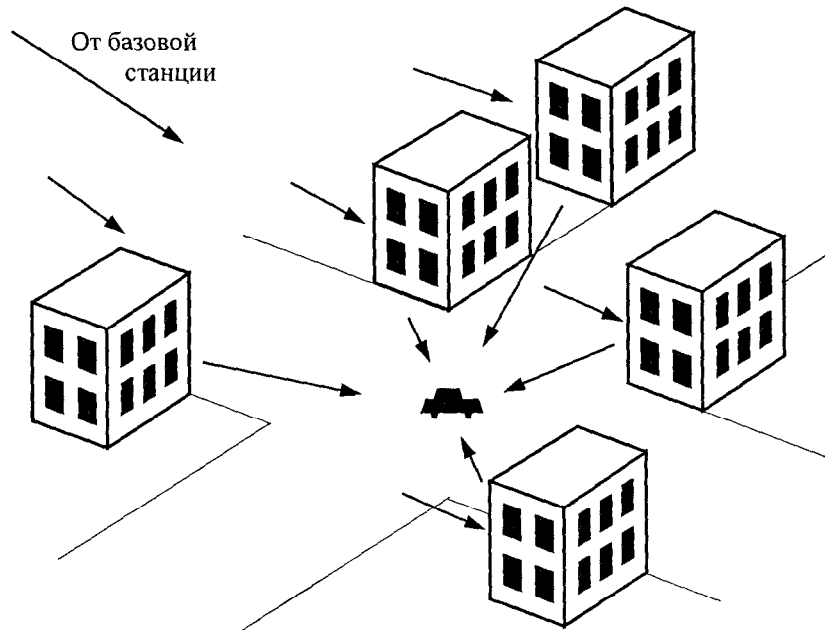


Рис. 2.51. Схема многолучевого распространения в условиях плотной городской застройки

рости перемещения подвижной станции: например, при скорости 50 км/ч период флуктуаций составляет около 10 мс, а при 100 км/ч – около 5 мс. Частота замираний глубиной 30...10 дБ при скорости порядка 50 км/ч составляет 5...50 провалов в секунду соответственно, а средняя длительность замираний ниже уровня 30...10 дБ при той же скорости – порядка 0,2...2 мс [133, 140].

Медленные замирания обусловлены изменением условий затенения при перемещении подвижной станции и подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. Интенсивность медленных флуктуаций не превышает 5...10 дБ, а их периодичность соответствует перемещению подвижной станции на десятки метров. Фактически медленные замирания представляют собой изменение среднего уровня сигнала при перемещении подвижной станции, на которые накладываются быстрые замирания вследствие многолучевого распространения.

Основную неприятность при сотовой связи составляют быстрые замирания, поскольку они бывают достаточно глубокими, и при этом отношение сигнал/шум падает настолько сильно, что полезная информация может существенно искажаться шумами, вплоть до полной ее потери. Для борьбы с быстрыми замираниями используются два основных метода:

- разнесенный прием, т.е. одновременное использование двух или более приемных антенн;
- работа с расширением спектра – использование скачков по частоте, а также метода CDMA.

Межсимвольная интерференция, как мы уже упоминали выше, может иметь место при значительных разностях хода между различными лучами в условиях многолучевого распространения. Практически разности хода в городских условиях могут достигать единиц микросекунд. В методе CDMA, при использовании широкополосных сигналов и рейк-приемников, наиболее сильные сигналы выравниваются по задержке и после этого складываются, так что проблема межсимвольной интерференции в значительной мере снимается. В относительно узкополосных системах сотовой связи, использующих метод TDMA, для борьбы с межсимвольными искажениями применяются эквалайзеры – адаптивные фильтры, устанавливаемые в приемном тракте цифровой обработки сигналов, которые позволяют в некоторой степени компенсировать межсимвольные искажения. Наконец, для борьбы с последствиями многолучевого распространения, а именно для устранения ошибок, обусловленных как замираниями сигналов, так и межсимвольной интерференцией, используется помехоустойчивое канальное кодирование: блочное и сверточное кодирование, а также перемежение. О канальном кодировании и методе CDMA речь уже шла ранее. В последующих разделах мы обсудим применение разнесенного приема, скачков по частоте и эквалайзеров.

2.4.5.2. Разнесенный прием

Идея *разнесенного приема* (английский термин *diversity reception*, или просто *diversity – разнесение*) как меры борьбы с быстрыми замираниями заключается в совместном использовании нескольких сигналов, различающихся (разнесенных) по какому-либо параметру или координате, причем разнесение должно выбираться таким образом, чтобы вероятность одновременных замираний всех используемых сигналов была много меньше, чем каково-либо одного из них. Иными словами, эффективность разнесенного приема тем выше, чем менее коррелированы замирания в составляющих сигналах. Кроме того, важны техническая реализуемость и простота используемого метода.

В принципе возможны как минимум пять вариантов разнесенного приема [140]:

- с разнесением во времени (*time diversity*); при этом используются сигналы, сдвинутые во времени один относительно другого; этот метод сравнительно легко реализуем лишь в цифровой форме, и улучшение качества приема размещается на пропускную способность канала связи;
- с разнесением по частоте (*frequency diversity*); при этом используются сигналы, передаваемые на нескольких

- частотах, т.е. платой является расширение используемой полосы частот;
- с разнесением по углу, или по направлению (*angle diversity*, или *direction diversity*); при этом прием производится на несколько антенн с рассогласованными (не полностью перекрывающимися) диаграммами направленности; в этом случае сигналы с выходов разных антенн коррелированы тем слабее, чем меньше перекрытие диаграмм направленности, но при этом одновременно падает и эффективность приема (интенсивность принимаемого сигнала), по крайней мере для всех антенн, кроме одной;
 - с разнесением по поляризации (*polarization diversity*), когда, например, две антенны принимают сигналы двух взаимно ортогональных поляризаций; практического значения этот вариант не имеет, поскольку в диапазоне СВЧ замирания на разных поляризациях сильно коррелированы;
 - с разносом в пространстве (*space diversity*), т.е. с приемом сигналов на несколько пространственно разнесенных антенн; это единственный метод, находящий практическое применение, и именно он обычно имеется в виду, когда говорят о разнесенном приеме.

Для метода пространственного разнесения, или, с учетом сказанного выше, для *разнесенного приема*, необходимы как минимум две приемные антенны, установленные с некоторым смещением одна относительно другой. Из общих соображений очевидно, что выигрыш от разнесенного приема тем больше, чем больше число используемых антенн, однако при этом возрастает и сложность технического решения. Поэтому практическое применение находит простейшая система с двумя приемными антеннами, и в основном в базовых станциях. В подвижных станциях сколь угодно широкого распространения разнесенный прием не получил. Существенными характеристиками системы разнесенного приема являются расстояние между антеннами и способ совместного использования сигналов с выходов двух антенн. Ограничимся краткими сведениями об этих характеристиках, не углубляясь в более подробный анализ. С ростом расстояния между антеннами корреляция между флуктуациями уровня принимаемых ими сигналов падает, и в этом смысле чем больше разнос антенн, тем выше эффективность разнесенного приема. Но при этом возрастает и сложность технической реализации, так что практически разнос берется минимально возможным, при котором разнесенный прием уже достаточно эффективен. Реально с учетом как аналитических оценок, так и эмпирических данных разнос обычно составляет около десятка длин волн, т.е. порядка нескольких метров.

Что касается способов объединения сигналов с выходов двух антенн, то в принципе возможно как использование одного (более сильного) из двух сигналов, так и суммирование обоих сигналов – додетекторное (когерентное) или последетекторное, – с равными весами или со взвешиванием, обеспечивающим по-

лучение максимума отношения сигнал/шум. В случае двух приемных антенн различие в эффективности этих способов относительно невелико, и на практике обычно применяется наиболее простой из них – выбор максимального из двух сигналов с коммутацией выхода соответствующего приемника на вход тракта последующей обработки.

2.4.5.3. Скачки по частоте

Использование скачков по частоте (*frequency hopping*), как мы уже упоминали ранее, является одним из методов расширения спектра, принципиально отличающимся от метода расширения спектра за счет модуляции *прямой последовательностью* (*direct sequence*), которая применяется в классическом методе CDMA (разд. 2.4.3.4).

Идея метода скачков по частоте состоит в том, что несущая частота для каждого физического канала периодически изменяется, т.е. каждый физический канал периодически переводится на новый частотный канал. Поскольку релеевские замирания являются частотно-селективными, то, если при работе на некоторой частоте имело место замирание, при изменении рабочей частоты на 100...300 кГц замирания с большой вероятностью не будет. Следовательно, при достаточно частых изменениях частоты существенно снижается вероятность длительных замираний, и соответственно в сочетании с перемежением снижается вероятность групповых ошибок, а с одиночными ошибками можно успешно бороться при помощи помехоустойчивого канального кодирования.

Различают медленные и быстрые скачки по частоте. При медленных скачках период изменения частоты много больше длительности символа передаваемого сообщения, а при быстрых скачках – много меньше длительности символа. В практике сотовой связи применение скачков по частоте предусмотрено стандартом GSM – используются медленные скачки с переключением частоты в каждом очередном кадре. Если учесть, что в кадре каждому физическому каналу соответствует один слот, то для любого из физических каналов такая частота скачков эквивалентна смене частотных каналов с частотой слотов.

Не рассматривая более подробных деталей технической реализации метода, отметим, что изменение частоты в пределах доступного диапазона может быть как регулярным (циклическим), так и нерегулярным (псевдослучайным), причем в последнем случае может быть выбран любой из имеющихся в наборе вариантов псевдослучайности. Режим работы со скачками по частоте не является обязательным и назначается по команде с центра коммутации.

2.4.5.4. Эквалайзинг

Рассмотрим эквалайзинг – метод, используемый в узкополосных TDMA-системах сотовой связи для компенсации межсимвольных искажений. Термин *эквалайзинг* заимствован из английского языка (*equalizing* – буквально *выравнивание*) и имеет в данном случае смысл компенсации той разности хода между составляющими лучами при многолучевом распространении, которая приводит к межсимвольной интерференции. Эквалайзер по своей сути – это адаптивный фильтр, настраиваемый таким образом, чтобы сигнал на его выходе был в возможно большей степени очищен от межсимвольных искажений, содержащихся во входном сигнале.

Простейшая реализация эквалайзера (рис. 2.52) – трансверсальный фильтр, подобный тому, который может использоваться в кодере речи (рис. 2.35), но с принципиально иным алгоритмом настройки. Покажем на простом примере, что такая схема может, по крайней мере в некоторых ситуациях, существенно ослабить межсимвольные искажения. Предположим, что входной сигнал эквалайзера состоит из основного сигнала – некоторой последовательности однобитовых символов (единиц и нулей, первый график на рис. 2.53,а) и его копии, ослабленной в три раза и сдвинутой во времени на длительность τ одного символа (второй график на рис. 2.53,а). Если дискрет линии задержки фильтра равен τ , а значение коэффициента в первом отводе $c_1 = -1/3$, то при сложении входного сигнала и сигнала с первого отвода получим следующее (рис. 2.53,б): основной сигнал (первая составляющая входного сигнала) остается без изменений; вторая составляющая входного сигнала

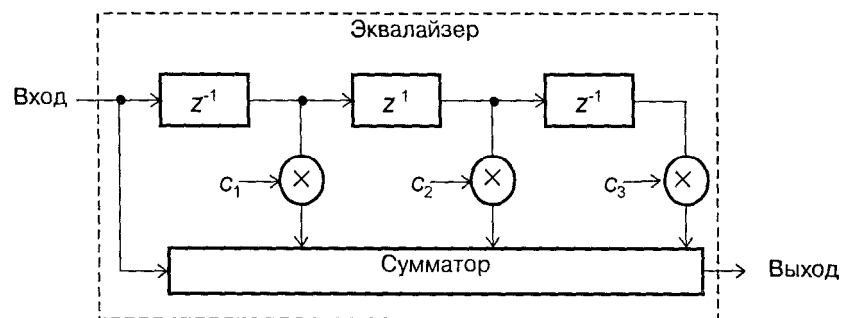


Рис. 2.52. Линейный эквалайзер на базе трансверсального фильтра с трехэлементной линией задержки

компенсируется первой составляющей, задержанной на τ (сигнала с первого отвода линии задержки); вторая составляющая задержанного сигнала дает копию основного, но ослабленную уже в девять раз, задержанную на 2τ и с обратным знаком. Если во втором отводе линии задержки коэффициент $c_2 = 1/9$, то при сложении трех сигналов – входного и двух задержанных – получим неизменный основной сигнал и его копию, задержанную на 3τ и ослабленную в 27 раз. Таким образом, в рассматриваемом примере добавление каждого следующего элемента линии задержки с соответствующим значением коэффициента c , приводит к ослаблению искажающего сигнала втрое и к дополнительной задержке его во времени на τ .

В реальной жизни, разумеется, дело обстоит сложнее, чем в описанном примере: и число лучей может быть больше двух, и задержки едва ли будут кратны дискрету линии задержки, и амплитуды составляющих сигналов, так же как и их число и задержки, не будут заранее известны. Кроме того, при перемещении абонентского аппарата вся эта картина непрерывно изменяется. Поэтому настройка фильтра производится адаптивно, в соответствии с конкретно складывающейся ситуацией, в отдельности для каждого

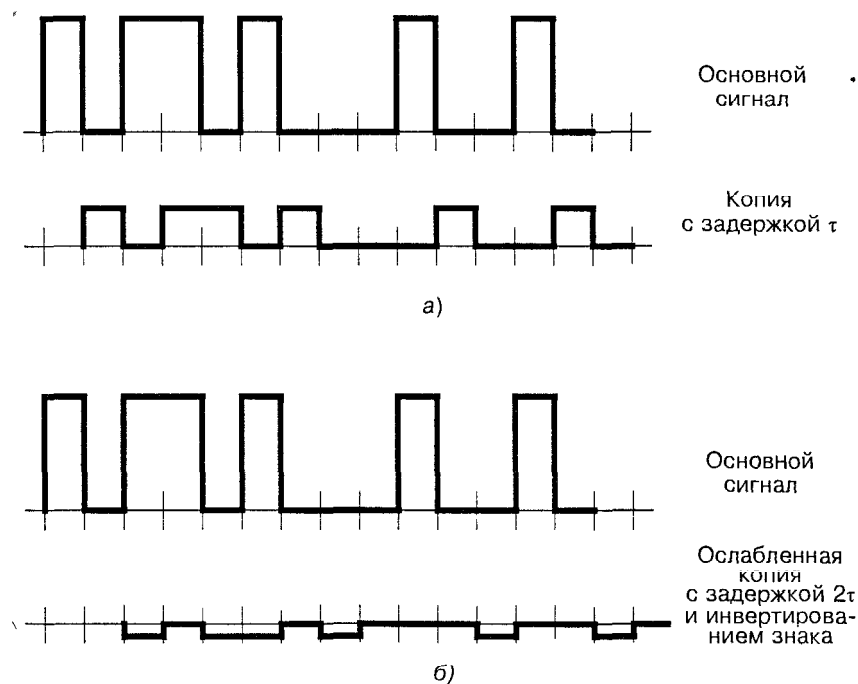


Рис. 2.53. К пояснению работы схемы эквалайзера

сегмента речи, передаваемого в одном слоте эфирного интерфейса, с использованием обучающей последовательности, передаваемой в каждом слоте (рис. 2.9, 2.10, 2.11). Простейший алгоритм настройки фильтра, минимизирующий среднеквадратическую ошибку на его выходе – стохастический градиентный алгоритм, в соответствии с которым вектор \mathbf{C} коэффициентов фильтра обновляется в результате последовательного применения рекуррентной процедуры:

$$\mathbf{C}_{k+1} = \mathbf{C}_k + \mu e_k \mathbf{X}_k, \quad k = 0, 1, \dots$$

Здесь k – номер шага итерационного процесса настройки, \mathbf{X} – вектор выборок входного сигнала фильтра, e – сигнал ошибки (разность между переданным символом и его оценкой на выходе фильтра), μ – коэффициент пропорциональности (величина шага), определяющий скорость сходимости итерационного процесса и запас устойчивости. Приведенный алгоритм обладает медленной сходимостью. Практически более удобен так называемый рекурсивный алгоритм минимума среднеквадратической ошибки, и в частности его эффективные в вычислительном отношении модификации, обеспечивающие более быструю сходимость. Помимо фильтра трансверсальной структуры, в эквалайзере может использоваться и фильтр решетчатой структуры, подобный применяемому в кодере речи (рис. 2.36), который в данном случае должен настраиваться адаптивно по обучающей последовательности очередного слота.

Приведенная на рис. 2.52 схема эквалайзера на основе трансверсального фильтра является линейной, так же как и соответствующая ей схема с решетчатым фильтром. Линейный эквалайзер относительно прост по устройству, но имеет недостатки, проявляющиеся при больших искажениях сигналов. Более совершенными являются нелинейные эквалайзеры – схема с обратной связью по решению, схема максимально правдоподобного обнаружения символов (максимума апостериорной вероятности) и схема максимально правдоподобной оценки последовательности; в первой из этих схем могут использоваться трансверсальные или решетчатые фильтры, во второй и третьей – трансверсальные. Общая длина линии задержки фильтра должна соответствовать той разности хода лучей, для которой желательно компенсировать искажения, а дискрет линии задержки должен быть менее длительности символа.

Более подробное рассмотрение эквалайзеров выходит за рамки возможностей данной книги, и мы вынуждены ограничиться изложенным, сославшись в отношении более подробных деталей на работы Проакиса [152, 153] и добавив еще следующее замечание. Блок эквалайзера входит в состав приемного тракта (рис. 2.6), и его устройство никак не влияет на состав и форму представления информации, передаваемой по эфирному интерфейсу. Поэтому схема и характеристики эквалайзера не только не регла-

ментрируются никакими стандартами, но и вообще блок эквалайзера может не включаться в состав приемного тракта аппаратуры сотовой связи. Иными словами, как включение эквалайзера в состав аппаратуры, так и выбор его схемы являются исключительно делом компании-изготовителя.

2.5. Сотовая связь как система массового обслуживания

Рассматривая в предшествующем изложении системы сотовой связи, в частности сопоставляя разные методы множественного доступа и обсуждая пути повышения емкости, мы использовали в качестве характеристики, связанной с емкостью системы, число каналов. Очевидно, однако, что создание достаточного числа каналов является не самоцелью, а лишь средством для обеспечения связью нужного числа имеющихся или потенциальных пользователей. Столь же очевидно, что, имея, например, N физических каналов на ячейку, мы, безусловно, сможем обеспечить в этой ячейке связью N абонентов. Но этого слишком мало: даже при 7-ячеечном кластере, как ясно из уже рассмотренного нами материала, число физических каналов на ячейку практически не может превышать в настоящее время величины порядка 200, а часто оказывается и гораздо меньшим – порядка 50...70 или даже 20...30. Ясно также, что ограничивать число обслуживаемых абонентов числом каналов явно нерационально, поскольку маловероятно, чтобы все абоненты захотели воспользоваться связью одновременно. Следовательно, при N каналах можно обслуживать более N абонентов, хотя, разумеется, в некоторых случаях абоненты в ответ на вызов будут получать отказ, и тем чаще, чем больше число абонентов по сравнению с числом каналов. Таким образом, мы оказываемся перед вопросом, который можно сформулировать следующим образом: сколько абонентов можно обслужить в ячейке с N каналами при заданной вероятности отказа? Или наоборот: сколько нужно каналов для обслуживания заданного числа абонентов при определенной вероятности отказа? Эти вопросы мы и рассмотрим в настоящем разделе, основываясь на методах расчета систем массового обслуживания.

Здесь уместно отметить, что система сотовой связи, как и любая система телефонной связи, является типичным примером системы массового обслуживания – со случайным потоком заявок (вызовов), случайной продолжительностью их обслуживания (сеансов связи) и конечным числом каналов обслуживания (физических каналов). Более того: система телефонной связи исторически была первым примером системы массового обслуживания, точнее – тем первым практическим поводом, с которого началось развитие теории систем массового обслуживания; в частности, в качестве первой математически корректной работы по теории массового

обслуживания называют работу Эрланга «Теория вероятностей и телефонные разговоры», опубликованную в 1909 г. [55].

Рассмотрение сформулированных выше вопросов мы проведем в такой последовательности: сначала приведем исходные определения и допущения, затем рассмотрим основные модели системы, остановившись подробнее на характеристиках обычно используемой в практике модели системы с отказами (модели Эрланга B), и закончим изложением методики расчета с примером.

Начнем с основных определений и обычно используемых допущений. Наиболее общей характеристикой случайного потока вызовов является *средняя частота поступления вызовов* λ , измеряемая числом вызовов в единицу времени – например, λ выз/ч.

Аналогичным образом вводится *средняя продолжительность обслуживания* одного вызова (средняя продолжительность разговора) T , измеряемая в единицах времени. Произведение указанных величин $A = \lambda T$ дает *средний трафик* (интенсивность трафика, интенсивность нагрузки, поток нагрузки), измеряемый в *эрлангах* – в честь датского ученого А.К.Эрланга (1878 – 1929 гг.) – первого ученого в области теории телеграфика. Например, если $\lambda = 20$ выз/ч, $T = 0,2$ ч, то трафик $A = 4$ эрл. Для измерения λ и T могут использоваться любые единицы времени, но, во избежание недоразумений, удобнее, если в обоих случаях единица времени одна и та же. Характеристики нагрузки – среднюю частоту поступления вызовов λ , трафик A – обычно оценивают для часа пик, т.е. для часового интервала в период наибольшей нагрузки системы связи.

Частота поступления вызовов, являющаяся случайной величиной, обычно описывается распределением Пуассона, определяющим вероятность поступления k вызовов (дискретная случайная величина) за время t :

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad \lambda t > 0, \quad k \geq 0.$$

При этом среднее число вызовов на интервале t и дисперсия числа вызовов на том же интервале равны соответственно

$$k = \lambda t, \quad D_k = \lambda t,$$

т.е. входящий в выражение для P_k параметр λ – это определенная выше средняя частота поступления вызовов (среднее число вызовов в единицу времени). В качестве иллюстрации на рис.2.54 приведен график распределения Пуассона для $\lambda t = 4$.

Продолжительность обслуживания одного вызова (длительность занятости канала связи) – непрерывная случайная величина τ – описывается экспоненциальным распределением

$$w(\tau) = \frac{1}{T} e^{-\tau/T}, \quad \tau \geq 0,$$

которому соответствуют среднее значение и дисперсия:

$$\tau = T, D_{\tau} = T^2,$$

т.е. среднее совпадает с определенной выше средней продолжительностью обслуживания одного вызова. На рис. 2.55 приведен график экспоненциального распределения для $T = 0,3$.

Перейдем к моделям системы сотовой связи. Во всех моделях поток вызовов принимается подчиняющимся распределению Пуассона, и продолжительность обслуживания вызова – экспоненциальному распределению, а разные модели отличаются одна от другой тем, какая участь постигает вызовы, поступающие в моменты времени, когда все каналы системы заняты. Эти вызовы могут сбрасываться, т.е. аннулироваться (система с отказами), или становиться в очередь и ждать освобождения канала неопределенно долгое время, после чего обслуживаться в течение необходимого интервала времени (система с ожиданием), возможны промежуточные случаи, например, модели с ожиданием, но в течение ограниченных интервалов времени.

В системе с отказами (модель Эрланга B ; в английской терминологии – lost-calls-cleared conditions, т.е. условия сброса вызовов, получивших отказ) вероятность отказа (вероятность поступления вызова в момент, когда все каналы заняты) определяется выражением

$$P_B = \frac{A^N / N!}{\sum_{n=0}^N (A^n / n!)} , \tag{2.2}$$

где N – число каналов, A – трафик.

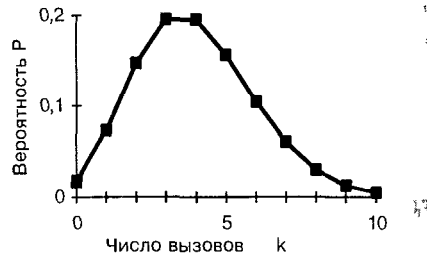


Рис. 2.54 Распределение Пуассона при $\lambda t = 4$

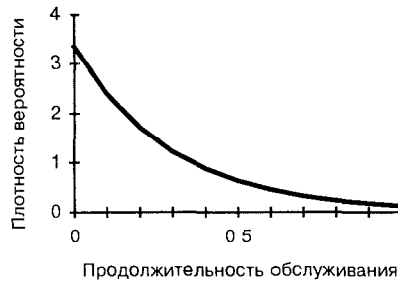


Рис. 2.55. Экспоненциальное распределение при $T = 0,3$

В системе с ожиданием (модель Эрланга С) вероятность задержки (вероятность того, что поступивший вызов не обслуживается немедленно, а становится в очередь)

$$P_C = P_{0C} \frac{A^N N}{N!(N-A)},$$

где, в дополнение к прежним обозначениям,

$$P_{0C} = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} (A^n / n!) + \frac{A^N N}{N!(N-A)}}$$

- вероятность того, что все каналы свободны.

В системе с ограничением времени ожидания и времени обслуживания после ожидания (модель Эрланга А или модель Пуассона) вызов, поступивший в момент занятости всех каналов, становится в очередь, но время ожидания не превышает среднего времени обслуживания (средней продолжительности разговора). Если за это время хотя бы один канал освобождается, вызов занимает его на оставшуюся часть среднего времени обслуживания, после чего сбрасывается. В такой системе вероятность отказа

$$P_A = \sum_{n=N}^{\infty} \frac{A^n}{n!} e^{-A}.$$

При оценках емкости систем сотовой связи обычно используется модель Эрланга В (модель системы с отказами). Некоторым оправданием к тому может служить то обстоятельство, что при малых вероятностях отказа модели Эрланга В и С дают достаточно близкие результаты (рис.2.56). Заметим попутно, что, как это наглядно видно из графиков рис.2.56, при $P_B > 0,1$ сравнительно небольшое возрастание трафика приводит к резкому росту вероятности отказа, т.е. к существенному ухудшению качества обслуживания. Поэтому расчет емкости системы обычно производится для значений P_B (вероятности отказа, или вероятности блокирования вызова) в пределах 0,01...0,05.

Приведем некоторые дополнительные характеристики для модели Эрланга В.

Вероятность того, что все каналы свободны,

$$P_{0B} = \frac{1}{\sum_{n=0}^N (A^n / n!)}.$$

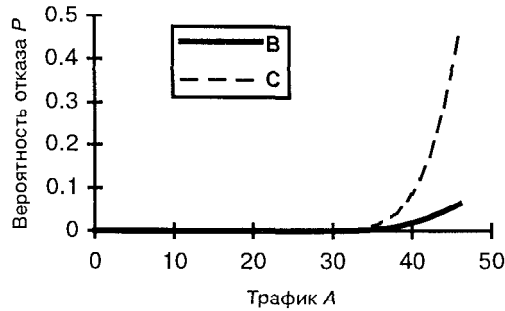


Рис. 2 56 Вероятность отказа (вероятность блокирования вызова) P в зависимости от трафика A (эрланг) при числе каналов $N = 50$ для моделей Эрланга B и C

Вероятность того, что занято K каналов,

$$P_{KB} = P_{0B} A^K / K! .$$

Среднее число занятых каналов:

$$K = P_{0B} \sum_{n=1}^N (A^n / (n-1)!) .$$

Формула (2.2), определяющая вероятность блокирования вызова в системе с отказами, несколько громоздка для непосредственного применения. На практике обычно пользуются ее представлением в виде таблицы [133, 88]. Пример табулированного представления этой формулы дает табл. 2.13. Опираясь на данные этой таблицы, отметим, что с увеличением числа каналов трафик растет быстрее, чем число каналов, особенно при числе каналов менее 30...40. Поэтому в рационально построенной системе сотовой связи должно быть во всяком случае не менее 30 каналов на ячейку.

Рассмотрим методику использования формулы (2.2). В нее входят три параметра: число каналов N , трафик A и вероятность отказа P_B . Если известны любые два параметра, можно однозначно найти третий. Например, если известно число каналов, и мы задаем некоторую вероятность отказа, то находим трафик, который при этом может быть обслужен. Приведем пример. Рассмотрим

систему сотовой связи, состоящую из 70 ячеек, в каждой из которых используется 30 каналов (если это цифровая система, использующая метод TDMA, то имеется в виду число физических каналов).

Таблица 2.13. Модель Эрланга В (система с отказами)

Число каналов N	Вероятность отказа P_B				
	0,002	0,01	0,02	0,05	0,10
	Трафик (эрланг)				
1	0,002	0,01	0,02	0,05	0,11
2	0,07	0,15	0,22	0,38	0,60
5	0,90	1,36	1,66	2,22	2,88
10	3,4	4,5	5,1	6,2	7,5
20	10,1	12,0	13,2	15,2	17,6
30	17,6	20,3	21,9	24,8	28,1
40	25,6	29,0	31,0	34,6	38,8
50	33,9	37,9	40,3	44,5	49,6
100	77,5	84,1	88,0	95,2	104,1
150	122,9	131,6	136,8	146,7	159,1
200	169,2	179,7	186,2	198,5	214,3

Если мы хотим обеспечить вероятность отказа 0,01, то в соответствии с табл. 2.13 может быть обслужен трафик 20,3 эрланга на ячейку. Если в час пик каждый абонент делает в среднем один вызов в час и средняя продолжительность разговора составляет 2 мин, или $1/30$ ч, то трафик на одного абонента составляет $1/30$ эрл, и, следовательно, в каждой ячейке может быть обслужено $20,3 : 1/30 = 609$ абонентов, а во всей системе, состоящей из 70 ячеек, $609 \cdot 70 = 42630$ абонентов.

Такова емкость рассматриваемой системы, рассчитанная в соответствии с общепринятым подходом для часа наибольшей нагрузки. При этом на основе приведенных выше формул среднее число занятых каналов $\bar{K} = 20,1$, а вероятность того, что все каналы свободны или что занято 10 или 20 каналов, составляет соответственно $P_{0B} = 1,55 \cdot 10^{-9}$, $P_{10B} = 0,055$, $P_{20B} = 0,09$.

2.6. Проблема проектирования систем сотовой связи

Проектирование – один из наиболее сложных и ответственных этапов развертывания сетей сотовой связи, поскольку он должен обеспечить возможно более близкое к оптимальному построение сети по критерию эффективность – стоимость.

Формально задача проектирования проста: надо определить места установки базовых станций («расставить базовые станции») и распределить имеющиеся частотные каналы между ячейками (составить территориально-частотный план в соответствии с принципом одновременного использования одних и тех же частот в геометрически разнесенных ячейках) таким образом, чтобы обеспечить обслуживание сотовой связью заданной территории с требуемым качеством при минимальном числе базовых станций, т.е. при минимальной стоимости инфраструктуры сети. Фактически эта задача очень сложна. С одной стороны, чрезмерное сгущение сети, то есть чрезмерно частая расстановка базовых станций, невыгодна, так как влечет за собой неоправданные затраты. С другой стороны, слишком редкое расположение базовых станций может привести к появлению необслуживаемых «белых пятен», что тем более недопустимо. Задача дополнительно осложняется трудностью аналитической оценки характеристик распространения сигналов и расчета напряженности поля, а также необходимостью учета неравномерности трафика в пределах обслуживаемой территории. Поэтому проектирование систем сотовой связи требует специалистов высокой квалификации, имеющих опыт как в части решения технических вопросов, так и в части характеристик рынка.

Подробное рассмотрение вопросов проектирования выходит за рамки плана данной книги, мы кратко рассмотрим лишь основные этапы решения этой проблемы.

Поскольку конфигурация и параметры сети существенным образом зависят от условий местности (рельефа, характеристик застройки и т.п.) и в ходе разработки проекта приходится выполнять большой объем расчетов, требующих интенсивного использования вычислительных средств, проектирование начинается с создания электронной карты территории, т.е. с переноса в компьютер топографической карты местности со всеми параметрами и характеристиками, существенными для составления проекта. Затем с учетом характеристик намечаемой к использованию аппаратуры и результатов приближенной оценки энергетического баланса производится предварительное проектирование ячеек сети и позиций базовых станций. Для полученной схемы с использованием имеющихся моделей распространения радиоволн и характеристик местности более точно рассчитываются параметры электромагнитного поля в пределах обслуживаемой территории, позволяющие оценить качество покрытия. Для той же схемы составляется территориально-частотный план (распределение частотных каналов по

ячейкам в соответствии с принципом повторного использования частот), а также оцениваются трафик и емкость для характерных участков и сети в целом. Если по каким-либо показателям (качество покрытия, трафик, емкость) составленная схема сети не удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям, производится ее корректировка, и для уточненной схемы указанные выше расчеты повторяются. Таким образом, в значительной своей части процесс проектирования оказывается итерационным.

Кроме того, в проектируемой сети обязательно производятся экспериментальные измерения характеристик электромагнитного поля, и по результатам измерений схема сети также корректируется. Необходимый объем экспериментальных измерений и частота их повторения определяются на основании опыта проектировщиков. Окончательно качество проекта выясняется и оценивается уже на этапе эксплуатации сети, где также неизбежны его корректировка и доработка, особенно в самом начале работы, когда производятся настройка и оптимизация сети. Этот этап работы фактически оказывается наиболее трудоемким. Наконец, последующие доработки проекта требуются по мере развития и совершенствования сети, для повышения ее качества, и в этом смысле можно сказать, что процесс проектирования сотовой сети, один раз начатый, уже никогда не заканчивается.

В заключение отметим, что с проблемой проектирования тесно связана проблема оценки зоны покрытия сети сотовой связи. Дело в том, что оценка зоны покрытия, в том числе и для уже действующей сети, производится расчетным путем, с экспериментальной проверкой в отдельных сечениях или на отдельных участках, поскольку сплошные экспериментальные измерения во всей сети чрезмерно трудоемки. Для оценки зоны покрытия действующей сети применяются те же методы расчета, что и при проектировании, и качество такой оценки тем выше, чем выше квалификация проектировщиков и чем совершеннее используемые ими методы проектирования.

2.7. Проблемы стандартизации и сертификации

В настоящем разделе мы рассмотрим проблемы стандартизации и сертификации в применении к сотовой связи. Стандартизация нужна в первую очередь для обеспечения совместимости технических решений, предлагаемых различными компаниями-производителями аппаратуры, т.е. для обеспечения возможности и удобства работы на общем рынке сотовой связи всех ее участников – изготовителей аппаратуры, сервис-провайдеров, операторов. Сертификация имеет целью установление соответствия выпускаемой на рынок аппаратуры существующим нормам и требованиям, в первую очередь в отношении биологической безо-

пасности и электромагнитной совместимости с другими радио-электронными средствами и системами.

Начнем с проблемы стандартизации. Вопросами стандартизации в области связи и в смежных областях занимается большое число организаций – всемирных, региональных и национальных [115]. Отметим лишь некоторые из них:

- Международный союз электросвязи (International Telecommunications Union – ITU), в частности, его сектор стандартизации средств электросвязи (telecommunications standardization) ITU-T, являющийся преемником Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии – МККТТ (Consultative Committee for International Telegraphy and Telephony – CCITT);
- Международная организация стандартов (International Standards Organization – ISO);
- Европейский институт стандартов электросвязи (European Telecommunications Standards Institute – ETSI);
- Межамериканская комиссия электросвязи (Inter-American Telecommunications Commission – CITEL);
- Американский национальный институт стандартов США (American National Standards Institute – ANSI);
- Ассоциация промышленности средств электросвязи США (Telecommunications Industry Association – TIA);
- Японский Комитет техники электросвязи (Telecommunications Technology Committee – TTC);
- Институт инженеров электротехники и электроники США (Institute of Electrical and Electronic Engineers – IEEE).

Каждая из перечисленных организаций, так же как и ряд других, не попавших в приведенный выше перечень, имеет четкую структуру и четко сформулированный круг задач, причем работа этих организаций координируется с использованием механизма межрегиональных конференций по стандартизации средств электросвязи. В соответствии с концепцией построения настоящей книги мы несколько подробнее остановимся на деятельности двух из перечисленных выше организаций – TIA и ETSI, разработавших соответственно основные из рассматриваемых в книге стандартов сотовой связи – D-AMPS и GSM.

Деятельность TIA обеспечивается компаниями-членами Ассоциации. Комитетами или подкомитетами TIA разработаны практически все стандарты сотовой связи США. Кредо этой организации в решении проблемы стандартизации весьма четко сформули-

ровано в информационном введении, предваряющем основной текст каждого из стандартов *) :

«Технические Стандарты и Публикации EIA/TIA предназначены служить общественным интересам, исключая недопонимание между производителями и покупателями, облегчая взаимозаменяемость и улучшение продукции и облегчая покупателю выбор и получение нужного ему продукта с минимальной задержкой. Существование таких Стандартов и Публикаций ни в коей мере не должно препятствовать любому члену или не члену EIA/TIA производить или продавать продукцию, не соответствующую этим Стандартам и Публикациям, равно как существование таких Стандартов и Публикаций не должно служить препятствием к добровольному использованию их не только членами EIA/TIA, как внутри страны, так и на международном уровне».

Приведем в качестве примера характеристики стандарта IS-136 – последней версии стандарта D-AMPS с усовершенствованными цифровыми каналами управления, принятого в декабре 1994 г. Этот стандарт состоит из четырех документов, охватывающих в совокупности все технические условия, необходимые для разработки аппаратуры, соответствующей требованиям IS-136:

- IS-136.1 (около 400 страниц): цифровой канал управления;
- IS-136.2 (около 400 страниц): требования к эфирному интерфейсу в части аналогового канала управления, аналогового канала речи и цифрового канала трафика (модификация стандарта EIA/TIA 627);
- IS-137 (около 120 страниц): минимальные требования к характеристикам подвижных станций (модификация стандарта EIA/TIA 628);
- IS-138 (около 70 страниц): минимальные требования к характеристикам базовых станций (модификация стандарта EIA/TIA 629).

Таким образом, общий объем комплекта документации стандарта IS-136 составляет около 1000 страниц, и он исчерпывающим образом определяет все принципиальные технические положения, составляющие основу стандарта.

ETSI, учрежденный странами Европейского сообщества в марте 1988 г., является межгосударственной организацией и придерживается примерно такого же подхода к проблеме стандартизации, как и TIA, хотя нам и не встречалось столь же четких, как у EIA/TIA, формулировок этого подхода. Тем не менее практически во всех публикациях, посвященных стандарту GSM, последовательно проводится та основная мысль, что стандарт не определя-

*) EIA (Electronic Industries Association) – Ассоциация электронной промышленности США; в ее обязанности, в числе прочего, входят публикация и распространение стандартов, разрабатываемых TIA.

ет, как именно строить аппаратуру, но детально определяет интерфейсы и функции, выполняемые этой аппаратурой. Тем самым в возможно меньшей степени ограничивается инициатива конструкторов и компаний-изготовителей аппаратуры, а операторам предоставляется возможность покупки и использования аппаратуры разных изготовителей. В составе технической части ETSI, возглавляемой технической ассамблеей, имеется 12 технических комитетов, в том числе Специальная группа по мобильным системам (TC SMG – Technical Committee Special Mobile Group), в ведении которой – разработка стандартов систем сотовой связи GSM 900 и GSM 1800.

Стандарт GSM 900 состоит из более чем 100 книг-спецификаций (технических условий) общим объемом более 5000 страниц, объединенных в 12 серий, от 2 до 30 книг в серии. Приведем в качестве примера названия нескольких серий (с краткими комментариями):

- Серия 01: Общие вопросы (терминология; классификация функций и фазы их реализации).
- Серия 02: Функциональные вопросы (подробное определение всех обеспечиваемых функций).
- Серия 03: Сетевые вопросы (организация функционирования сети сотовой связи).
- Серия 04: Интерфейс подвижная станция – базовая станция и протоколы обмена.
- Серия 05: Физический уровень радиоканала (мультиплексирование и множественный доступ, канальное кодирование, модуляция, синхронизация).
- Серия 06: Кодирование речи.
- И т.д.

Примеры самых больших по объему книг:

- Книга 04.08: Уровень 3 мобильного радиointерфейса (около 450 страниц).
- Книга 09.02: Мобильные приложения (прикладные протоколы между коммутаторами и базами данных – более 500 страниц).
- Книга 11.10: Требования к подвижной станции (более 500 страниц).
- Книга 11.20: Требования к базовой станции (более 400 страниц).

Ядро стандарта GSM 1800 (DCS 1800) составляют спецификации стандарта GSM 900; к ним добавлено 14 дополнительных

спецификаций (*дельта-спецификаций*), определяющих отличия GSM 1800, например [120]:

- Книга 02.06 – DCS: определение классов мощности подвижных станций.
- Книга 02.11 – DCS: определение национального роминга.
- Книга 03.12 – DCS: модификация процедуры регистрации местоположения для национального роминга.
- И т.д.

Мы видим, что в стандарте GSM объем документации значительно больше, чем в стандарте D-AMPS, что в общем соответствует более сложной организации первого, в том числе включению в него таких вопросов, как роминг, организация работы сети, организация проверок и испытаний аппаратуры.

Перейдем к проблеме сертификации [34]. Сертификация технических средств связи – относительно новое для России дело. В 1992 г. была разработана система сертификации «Электросвязь», и с этого времени работа по сертификации регулярно ведется Министерством связи РФ (с марта 1997 г. – Государственным комитетом РФ по связи и информатизации – Госкомсвязи России). Законодательным основанием для сертификационной деятельности служат законы Российской Федерации: «О защите прав потребителей», «О стандартизации», «О сертификации продукции и услуг», «О связи». Сертификация, наряду с лицензированием и инвестициями, является одним из основных инструментов проведения государственной политики в области связи. Конкретная задача процедуры сертификации заключается в проверке сертифицируемых образцов на соответствие требованиям государственных стандартов (включая стандарты безопасности), электромагнитной совместимости, экологии, Взаимоувязанной сети связи РФ, руководящих документов заинтересованных международных и российских организаций. При этом существенной особенностью сертификации в применении к сотовой связи в современных российских условиях является то, что практически вся используемая аппаратура является импортной.

Упрощенная схема процесса сертификации такова. Заинтересованная организация или компания (заказчик) подает заявку на сертификацию, по которой орган сертификации (Управление сертификации Госкомсвязи России) принимает решение о проведении сертификации и направляет заявку в один из испытательных сертификационных центров или лабораторий. Последние проводят необходимые испытания и результаты представляют в Управление сертификации, которое, после соответствующего рассмотрения и оформления, направляет материалы в сертификационную комиссию Госкомсвязи. По результатам рассмотрения на комиссии принимается решение о выдаче сертификата, который выдается от имени центрального органа сертификации – Госкомсвязи России.

Время и место проведения сертификационных испытаний, а также их стоимость определяются договором между центром сертификации и заказчиком сертификата.

Все испытательные сертификационные центры и лаборатории, в соответствии с законом о сертификации, проходят обязательную процедуру аккредитации, целью которой является подтверждение их технической компетентности и независимости от производителей и потребителей испытываемой аппаратуры.

В заключение отметим, что действующая система сертификации, вероятно, еще далека от идеала и она будет продолжаться совершенствоваться, в том числе с учетом новых потребностей, возникающих по мере распространения и развития систем сотовой связи в России.

2.8. Заключительные замечания

Заканчивая раздел 2, посвященный техническим проблемам сотовой связи, нам хотелось бы еще раз подчеркнуть схематичность изложения рассмотренных здесь вопросов и привести несколько дополнительных пояснений и примеров.

Схематичная форма подачи материала, как мы уже отмечали в разделе 2.1, выбрана вполне сознательно – для представления основных идей и принципов технических решений в пределах ограниченного объема книги, во избежание превращения ее в громоздкий технический справочник. Содержание последнего скорее всего оказалось бы неоправданно пестрым и чрезмерно детализированным, а объем – нереализуемо большим в силу ряда причин:

- наличия нескольких стандартов, существенно отличающихся один от другого, причем каждый из них достаточно сложен сам по себе;
- различия технических решений разных компаний-производителей аппаратуры – даже в пределах одного и того же стандарта;
- возможности выбора различных конфигураций (комбинаций) системы сотовой связи, как по аппаратуре (hardware), так и по программному обеспечению (software), даже в пределах разработки одной и той же компании-производителя аппаратуры.

Хотя в рамках настоящей книги мы ограничились в основном двумя цифровыми стандартами – GSM и D-AMPS, даже здесь существует множество деталей и различий, которые остались «за кадром». Например, в разделе 2.2.1 мы упоминали, что в стандарте GSM базовая станция имеет более сложную структуру, чем в стандарте D-AMPS, но в дальнейшем мы говорили о некоторой «обобщенной» (и упрощенной) базовой станции, не акцентируя

внимание на этих различиях. В системе сотовой связи стандарта GSM есть еще один существенный элемент, о котором мы вообще не упоминали, – это Центр управления и эксплуатации (Operation and Maintenance Centre – OMC); мы молчаливо предполагали, что все его функции реализуются Центром коммутации.

Высокая степень гибкости системы сотовой связи в значительной мере определяется наличием в ее составе сложного и многофункционального программного обеспечения (software). Последнее может варьироваться по составу и функциональным возможностям – поставкой той или иной версии программного обеспечения с реализацией соответственно различных режимов работы и разных наборов функций (услуг) системы, а также за счет программирования и/или перепрограммирования оператором отдельных его элементов. При этом могут быть заданы или изменены, например, такие характеристики:

- частота повторной регистрации подвижных станций в системе;
- размер области передачи вызова на подвижную станцию (величина окрестности той соты, в которой в последний раз регистрировалась подвижная станция);
- максимально допустимые уровни (ступени) излучения передатчиков базовых и/или подвижных станций;
- временная задержка переадресации вызова, когда абонент не отвечает;
- и т.д.

На различиях и вариантах режимов работы такого рода мы также не останавливались.

Таким образом, все изложенное в разделе 2 справедливо, но дает лишь принципиальные основы технических аспектов сотовой связи и никак не заменяет соответствующих технических описаний и инструкций, которые в необходимых случаях должны использоваться для подробного знакомства с конкретными системами и аппаратурой сотовой связи.

Глава 3 **СОТОВЫЙ ТЕЛЕФОН С ПОЗИЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**

3.1. Вводные замечания

Если в разд. 2 мы рассматривали сотовый телефон с точки зрения инженера и интересовались тем, как он устроен и как работает, то в настоящем разделе мы рассмотрим его с другой стороны – со стороны пользователя. Сначала мы расскажем об абонентском аппарате и о том, какими возможностями он обладает (разд. 3.2), а затем – об услугах, предоставляемых сетью сотовой связи (разд. 3.3). Фактически услуг сотовой связи мы уже касались в разд. 2.3.6, но там мы называли их «функциями», акцентируя внимание на технической стороне проблемы, а здесь мы рассмотрим их подробнее в пользовательском аспекте. Конечно, разделение этого материала на возможности аппарата, как такового, и услуги сети в значительной мере условно, но коль скоро мы эту условность оговорили, принятое структурирование удобно, так как позволяет построить изложение более четко.

В трех последних разделах (3.4 – 3.6) мы рассмотрим такие актуальные для абонента сотовой связи проблемы, как обеспечение конфиденциальности связи, фрод (мошенничество) и биологическая безопасность. Каждый из этих вопросов представляет самостоятельный интерес и рассматривается отдельно.

3.2. Абонентский радиотелефонный аппарат и его возможности

Наиболее распространенный в настоящее время тип абонентского аппарата – ручной (handheld). По внешнему виду такие аппараты напоминают карманные калькуляторы первых выпусков, и именно их мы в первую очередь будем иметь в виду. Типовая масса такого аппарата – 150...200 г вместе с источником питания, типовые габариты 130 × 60 × 25 мм. На лицевой стороне аппарата имеется небольшой дисплей, обычно жидкокристаллический, на котором отображаются набираемый номер телефона, пункты меню и другая информация. Из верхней части аппарата выступает антенна длиной 20...60 мм; в некоторых типах аппаратов она дополнительно выдвигается на 50...150 мм. Все управление производится при помощи клавиш (кнопок) наборного поля: с их помощью

можно включить и выключить аппарат, набрать нужный номер, записать информацию в память и прочесть записанное ранее, изменить режим работы аппарата и т.п. На лицевую сторону аппарата выводятся динамик (в верхней части) и микрофон (в нижней части), так что аппарат прикладывается к уху, как трубка обычного телефона. В верхней части аппарата обычно располагаются световой индикатор (светодиод), отображающий режим работы (режим ожидания, вызов, включено), и источник звукового сигнала (звонок). Некоторые типы аппаратов имеют отдельные кнопки включения/выключения и регулировки громкости звука. На тыльной стороне при помощи защелки крепится источник питания – аккумуляторная батарея. По цвету и форме батареи выполняется таким образом, что образует единое целое с корпусом аппарата. Типовое время работы полностью заряженной батареи составляет: в режиме разговора до 2...5 ч, в режиме ожидания вызова до 20...50 ч; типовое время заряда батареи 1...3 ч. В нижней части аппарата обычно имеются гнезда для подключения портативного зарядного устройства, позволяющего заряжать батарею, не отключая ее от аппарата и не выключая последнего.

Аппарат можно носить в кармане пиджака или куртки или в дамской сумочке. Имеются специальные приспособления (зажимы) для крепления аппарата на поясном ремне и различные чехлы (футляры) из кожи или кожзаменителя, также с приспособлениями для крепления на ремне. В числе принадлежностей к аппаратам – комплекты «handsfree» («свободные руки») с громкоговорящей связью для пользования мобильным телефоном в автомобиле без отрыва рук от руля и стационарные зарядные устройства для аккумуляторных батарей с питанием от обычной электросети. Портативные зарядные устройства могут быть различных типов – с питанием как от стационарной электросети, так и от бортовой сети автомашины (через гнездо прикуривателя).

Чтобы позвонить с предварительно включенного аппарата, в простейшем случае абонент набирает с помощью клавиш нужный номер, проверяет правильность набора по отображению номера на дисплее и нажимает клавишу вызова («Send» или «Yes»). После соединения и ответа вызываемого абонента он обычным образом ведет разговор, а по окончании его нажимает клавишу отбоя («End» или «No»). При получении вызова, о чем абонент оповещается звуковым сигналом (звонок), он манипулирует теми же клавишами.

Абонентский аппарат, однако, предоставляет и много дополнительных возможностей, некоторые из которых мы коротко перечислим.

Аппарат в большинстве случаев может быть использован в качестве электронной записной книжки, часов, календаря, калькулятора. Электронная записная книжка вмещает обычно около 100 телефонных номеров с комментариями (именами владельцев номеров); в нее может быть внесена и любая другая информация, например адрес или номер паспорта. Информация из электронной

записной книжки может быть высвечена на дисплее. По номеру телефона, внесенному в электронную записную книжку, можно позвонить, не набирая его по цифрам, а вызвав из памяти по номеру записи или по имени владельца. На дисплее могут отображаться время суток и текущая дата, причем счет времени не сбивается при выключении аппарата или при снятии батареи, а формат представления времени и даты выбирается абонентом. В некоторых аппаратах часы могут выполнять функцию будильника, и последний также срабатывает при выключенном аппарате. Практически все современные аппараты имеют систему меню, с помощью которой производится выбор параметров и вариантов режима работы аппарата. Во всех аппаратах на дисплее отображается уровень принимаемого сигнала и степень разряда аккумуляторной батареи, в большинстве из них имеется подсветка дисплея и клавиатуры. Абонент имеет возможность по своему усмотрению регулировать громкость звука в телефоне и громкость звонка, выбирать тип звонка и т.п.

Особо следует сказать о мерах, направленных на предотвращение несанкционированного пользования аппаратом. Мы уже рассматривали процедуру аутентификации (раздел 2.3.3), выполняемую при установлении связи и практически исключающую возможность появления «двойников», по крайней мере в цифровых стандартах, за счет использования достаточно совершенных алгоритмов аутентификации. Кроме того, в абонентских аппаратах обычно предусматривается возможность блокировки: в этом случае для того, чтобы пользоваться аппаратом, абонент после его включения должен прежде всего ввести код, значение которого он может установить по своему усмотрению. Имеется также возможность блокировки клавиатуры, чтобы избежать непреднамеренной выдачи команд при случайном нажатии клавиш, а также установки назначаемого абонентом пароля для ввода и отмены запретов на определенные категории вызовов.

В аппаратах стандарта GSM дополнительные возможности защиты связаны с использованием съемной SIM-карты. Унифицированная SIM-карта, одинаковая для всех стандартов GSM – GSM 900, GSM 1800 и GSM 1900, – может быть одного из двух вариантов: «стандартная» (стандарт ISO – International Standard Organization) – размером 55 × 85 мм, типа банковской кредитной карты, или миниатюрная «вставная» («plug-in») размером 15 × 25 мм; толщина ее в обоих случаях менее миллиметра. Аппарат без SIM-карты неработоспособен, хотя и в этом случае (как, впрочем, и при установленной блокировке аппарата) с него можно сделать экстренные вызовы по номеру 112 – международному номеру экстренной помощи. После включения аппарата с установленной SIM-картой нужно прежде всего снять блокировку последней – ввести так называемый PIN-код (PIN – Personal Identification Number – персональный идентификатор), значение которого также может быть изменено по усмотрению абонента. Записанный на SIM-карте

международный идентификатор абонента IMSI однозначно определяет номер его телефона. Кроме того, на SIM-карте имеется некоторый объем доступной для абонента оперативной памяти, позволяющий записать до 100 номеров телефонов с комментариями (например, с именами абонентов) и до 10 текстов коротких сообщений. Когда SIM-карта вынимается из аппарата, она сохраняет всю содержащуюся на ней информацию – персональные идентификаторы, ключи, шифры и пароли, а также записанные абонентом номера телефонов и сообщения – и может работать с другим аппаратом. Таким образом, SIM-карта как бы «персонализирует» абонентский аппарат, в который она устанавливается.

Помимо портативных абонентских аппаратов находят применение и стационарные. Они могут быть установлены, например, в загородных домах, на промышленных объектах или строительных площадках – это удобно там, где отсутствует обычная телефонная связь. Благодаря внешней направленной антенне и повышенной чувствительности стационарные аппараты позволяют увеличить радиус действия связи по сравнению с мобильными на 20...30 км. К стационарному аппарату обычно бывает возможно подключить телефонный аппарат любого типа, факсимильный аппарат, модем, автоответчик, офисную АТС, охранную сигнализацию. Питание стационарного аппарата осуществляется от обычной электросети или от автономного внешнего источника (аккумулятора).

На начальных этапах развития сотовой связи широко применялись переносные (более громоздкие, чем ручные) или автомобильные аппараты (терминалы). Теперь они уверенно вытесняются портативными (ручными).

3.3. Услуги сотовой связи

Основные услуги сотовой связи включают обычную телефонную связь, передачу и прием факсимильных сообщений, коротких сообщений и компьютерных данных.

Услуга телефонной связи (передача речи) едва ли требует каких-либо дополнительных комментариев. Здесь, пожалуй, можно только заметить, что по качеству связи сотовая сеть практически не уступает стационарной проводной телефонной сети общего пользования, но при этом абонент обладает неограниченной возможностью перемещения в ходе разговора в пределах зоны действия сети.

Для передачи и приема факсимильных сообщений и компьютерных данных, помимо мобильного абонентского аппарата сотовой связи, требуется использование мобильного факсимильного аппарата или переносного компьютера с соответствующими блоками сопряжения. По этому поводу вполне возможен вопрос: а бывает ли когда-нибудь необходимость в пользовании этими услу-

гами? Конечно, пользоваться мобильным факсом или передачей компьютерных данных с мобильного телефона приходится несравненно реже, чем обычной телефонной связью, но тем не менее приходится, и вот простой пример. Раньше корреспондент, освещающий, скажем, спортивные соревнования, записывал свои впечатления в блокнот, затем готовил рукописный текст статьи и спешил в пресс-центр, где по телефону диктовал срочный материал в номер. Теперь же он ведет запись на магнитофон, а затем, устроившись в спокойном месте, набирает статью на портативном компьютере, подключает его к своему сотовому телефону и пересылает файл в редакцию – оперативно и комфортно. На самом деле это удобно не только корреспондентам, но и часто разъезжающим деловым людям – все необходимые виды связи под рукой, ни от кого и ни от чего не надо зависеть.

Услугу передачи и приема коротких сообщений (английский термин Short Message Service – SMS) поясним несколько подробнее. Короткое сообщение (обычно до 80...160 символов) может быть получено во время ведения разговора, в режиме ожидания или даже при выключенном абонентском аппарате. В последнем случае сообщение записывается в память вычислительных средств центра коммутации, и абонент извещается о получении сообщения сразу же после включения аппарата. Сообщение может быть прочитано сразу после получения или позднее; прочитанное сообщение может быть стерто или сохранено в памяти аппарата для повторного прочтения. Для чтения сообщение отображается на дисплее аппарата; если оно не помещается на дисплей целиком, то отображается по частям. Если нужно передать короткое сообщение, текст его набирается при помощи клавиш аппарата и отображается на дисплее. Затем сообщение либо отправляется по указанному отправителем номеру телефона, либо не отправляется, а сохраняется в памяти для отправки в другое время. Таким образом, фактически обеспечивается совмещение сотового телефона с пейджером, причем абонент непосредственно сам отправляет свое сообщение, а доставка его адресату гарантируется компанией-оператором. Существует и такой вариант этой услуги, как передача коротких сообщений в режиме вещания, т.е. передача их одновременно группе абонентов.

Перейдем к дополнительным услугам и отметим в первую очередь переадресацию вызова, сохранение (удержание) вызова и ожидание вызова.

Услуга переадресации вызова (call forwarding, или call divert) позволяет абоненту направить вызов, поступающий на номер его телефона, на другой номер, заранее определенный самим абонентом. Переадресация может быть безусловной, когда переадресуются все поступающие вызовы, или условной, если номер абонента занят или абонент не отвечает («не снимает трубку») в течение определенного промежутка времени, или если абонент недоступен (его аппарат выключен или находится вне зоны действия сети). Рассматриваемая услуга, как и большая часть описываемых ниже,

реализуется центром коммутации, или, как еще говорят, сетью сотовой связи, чем подчеркивают, что в предоставлении услуги участвует не только абонентский аппарат. Входящий вызов может быть переадресован на любой номер телефона, например на домашний стационарный телефон абонента, или на «почтовый ящик» голосовой почты, речь о которой впереди.

Услуга сохранения (удержания) вызова (call hold) позволяет абоненту прервать текущий разговор, не разрывая линию связи. В паузе абонент может принять вновь поступивший (входящий) вызов или сам позвонить другому абоненту (исходящий вызов), а затем вернуться к прерванному разговору.

Услуга ожидания вызова (call waiting) позволяет абоненту в ходе разговора по телефону получить сигнал о поступлении еще одного входящего вызова. В таком случае абоненту предоставляется три варианта действий:

- отказаться от второго вызова;
- закончить первый разговор, и перейти ко второму;
- прервать первый разговор, воспользовавшись услугой сохранения вызова, ответить на второй вызов, а по его окончании вернуться к прерванному первому.

В первом случае вызывающий абонент получает в ответ сигнал «занято», а во втором и третьем его вызов ожидает, пока не получит соединения.

Остановимся кратко на других дополнительных услугах.

Услуга конференц-связи (conference call, или multiparty call) позволяет вести разговор по телефону одновременно нескольким (от трех до шести) абонентам. При этом организатор конференц-связи, т.е. абонент, который «собрал» группу собеседников, имеет возможность временно или окончательно отключить от общего разговора любого из участников, или закончить сеанс конференц-связи в целом.

Услуга запрета (или ограничения) определенных категорий вызовов (call barring) позволяет абоненту исключить, например, все входящие вызовы, или все исходящие вызовы, или все исходящие международные вызовы. При этом для установки или снятия запрета используется индивидуальный пароль абонента, исключающий возможность несанкционированного управления запретом со стороны посторонних лиц.

Услуга закрытой группы пользователей (closed user group) позволяет организовать корпоративную связь между членами определенной группы абонентов, причем члены закрытой группы могут общаться между собой без ограничений, а возможность общения с «внешним миром» по входу и/или по выходу предоставляется лишь отдельным членам группы.

Возможна услуга автоматического определения вызывающего номера, а также запрета определения номера; запрет накладывается со стороны вызывающего абонента и имеет более высокий приоритет, чем определение номера. Возможность автоматического определения номера в сочетании с возможностью со-

хранения номера в памяти абонентского аппарата позволяет абоненту спустя некоторое время узнать, с каких номеров он получал вызовы, в том числе какие из них остались без ответа.

Услуга голосовой почты позволяет оставить на персональном автоответчике абонента голосовое сообщение, если абонент по какой-либо причине не может принять его в момент передачи, например если абонентский аппарат выключен или находится вне зоны действия сети или если абонент не отвечает. Адресат получает извещение о поступившем сообщении и прослушивает его в удобное для себя время. Полученное сообщение абонент может стереть или сохранить, чтобы иметь возможность прослушать его еще раз. Абоненту предоставляется возможность записать индивидуальное приветствие, которое звучит при подключении вызывающего абонента к персональному автоответчику.

Возможны различные варианты подключения абонентов к сети. Например, возможно подключение без предоставления постоянного «городского» номера (т.е. номера стационарной телефонной сети общего пользования). При этом абонент без ограничений пользуется связью в пределах сотовой сети и, возможно, всеми вариантами исходящей связи, а на входящую связь извне сотовой сети накладываются ограничения, зависящие от возможностей сети. Возможно предоставление двух «городских» номеров на один абонентский аппарат, причем каждый номер может иметь свой набор услуг, обслуживаться по своему тарифному плану, и на каждый из номеров может выставляться отдельный счет.

Очень важна и удобна услуга роamingа, позволяющая пользоваться сотовой связью не только в «своей» сети, но и в других сетях, технически совместимых с «домашней», при наличии соответствующих роamingовых соглашений. Здесь отдельно следует упомянуть возможность роamingа с SIM-картами стандарта GSM (пластикового роamingа), о которой уже шла речь выше; эта возможность позволяет осуществлять роaming между сотовыми сетями стандартов GSM 900, GSM 1800 (DCS 1800) и GSM 1900 (PCS 1900) даже при использовании однодиапазонных терминалов (абонентских аппаратов) за счет перестановки SIM-карты из аппарата одного стандарта в аппарат другого.

И в заключение еще раз отметим, что в любой конкретной сети могут быть реализованы не все перечисленные услуги – это зависит от стандарта и варианта используемого аппаратурно-программного комплекса, равно как в некоторых сетях могут быть услуги, не попавшие в приведенный выше перечень.

3.4. Конфиденциальность связи

Под обеспечением конфиденциальности связи мы понимаем в данном случае защиту от подслушивания передаваемых сообщений. Существуют и другие аспекты безопасности (*security*) связи, в

частности защита от несанкционированного доступа к каналам связи, целью которого является бесплатное или почти бесплатное пользование связью. Меры защиты от такого несанкционированного доступа и некоторые другие связанные с этим вопросы мы рассмотрели в разд. 2.3.3. В разд. 3.5 мы несколько подробнее расскажем о проявлениях и разновидностях фрода (мошенничества) в сотовой связи. Здесь же остановимся именно на защите информации от подслушивания.

Следует признать, что, несмотря на сложность технической реализации сотовой связи, от подслушивания она не защищена, если для этого не принимаются специальные меры. В аналоговых системах подслушать передаваемую информацию проще, в цифровых – сложнее, но в обоих случаях эта задача технически разрешима. Из предшествующего изложения, вообще говоря, в достаточной степени очевидно, что для подслушивания, например, информации цифровой системы сотовой связи необходимо располагать радиоприемным устройством высокой чувствительности (по сути – своего рода разведывательным приемником), способным обеспечить решение трех задач:

- настройку на частоту нужного частотного канала;
- временную синхронизацию (выделение определенного физического канала, т.е. нужного временного слота в каждом кадре передаваемой информации);
- корректное декодирование информации нужного физического канала.

Ясно также, что по сложности такой приемник соизмерим с абонентским терминалом, хотя стоит заметно дороже последнего, в первую очередь – за счет несравненно меньшего объема производства.

Специальные технические меры для защиты от подслушивания возможны – это шифрование передаваемой информации. Шифрование предусмотрено обоими рассматриваемыми нами цифровыми стандартами: и D-AMPS, и GSM. В системе D-AMPS (стандарты IS-54 и IS-136) процедура шифрования фактически только упомянута, а подробное ее описание вынесено в документы более ограниченного распространения. В стандарте GSM процедура шифрования определена достаточно прозрачно, и принципы ее реализации мы здесь изложим [143, 156].

Собственно шифрование осуществляется между помехоустойчивым канальным кодированием и перемежением (рис. 2.37) и заключается в поразрядном сложении по модулю 2 информационной битовой последовательности и специальной псевдослучайной битовой последовательности, составляющей основу шифра. Определение операции сложения по модулю 2 приводилось нами в связи с описанием принципов канального кодирования (табл. 2.8); эта операция известна также как логическая операция *Исключительное ИЛИ*. Нетрудно убедиться, что повторное применение операции *Исключительное ИЛИ* с той же псевдослучайной последовательностью к зашифрованной информации

ной последовательности восстанавливает исходную информационную битовую последовательность, т.е. реализует дешифрацию зашифрованного сообщения (рис. 3.1).

Исходная информация:	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	...
Шифрующая псевдослучайная последовательность:	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	...
Зашифрованная информация:	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	...
Дешифрующая псевдослучайная последовательность:	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	...
Расшифрованная информация:	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	0	...

Рис.3.1. Принцип шифрования и дешифрации информации в стандарте GSM

Практически при назначении режима шифрования одновременно используются две псевдослучайные последовательности: первая (S1) – в прямом канале для шифрования информации на базовой станции и дешифрации на подвижной станции и вторая (S2) – в обратном канале для шифрования информации на подвижной станции и дешифрации на базовой (рис. 3.2). Псевдослучайные последовательности S1, S2 генерируются алгоритмом A5 в функции номера кадра эфирного интерфейса и ключа шифрования Kc. Последний вычисляется при помощи алгоритма A8 (алгоритм вычисления ключа шифрования) по аргументам Ki (ключ аутентификации) и R (псевдослучайное число); это делается одновременно с вычислением алгоритмом A3 зашифрованного отклика S для процедуры аутентификации (разд. 2.3.3), т.е. ключ шифрования Kc обновляется при каждом сеансе связи. Таким образом, хотя процедура шифрования в стандарте GSM действительно достаточно прозрачна, воспроизвести ее с целью расшифровки зашифрованных сообщений не так просто, так как для генерации последовательностей S1, S2 надо в реальном времени определять номер кадра эфирного интерфейса и ключ шифрования Kc. Кроме того, алгоритм A5 является секретным: его описание не включено в общие спецификации стандарта GSM, и он распространяется под жестким контролем международной ассоциации компаний-операторов стандарта GSM – GSM MoU Association.

Помимо рассмотренного выше технического аспекта с шифрованием информации тесно связана правовая проблема – обеспечение взаимодействия с правоохранительными органами, требующее отдельного согласования. Мы не будем вдаваться в подробности этой проблемы, отметив только, что она существует во всех странах. Например, в США решением Министерства юстиции головная роль в организации взаимодействия с промышленностью отведена ФБР, в котором создана специальная группа по контактам с промышленностью средств электросвязи [158].

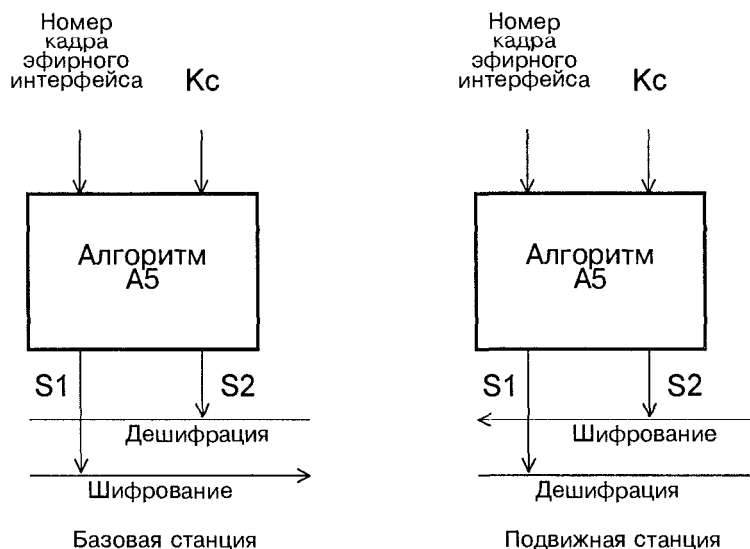


Рис.3.2. Схема генерации псевдослучайных шифрующей и дешифрующей последовательностей S1, S2

В принципе существует еще одна возможность защиты от подслушивания: это так называемое *скремблирование* (*scrambling* – перетасовка, перемешивание) – своеобразное шифрование путем перестановки участков спектра или сегментов речи, осуществляемое во внешнем по отношению к абонентскому терминалу устройстве, с соответствующим *дескремблированием* на приемном конце. Однако этот способ, строго говоря, непосредственно к сотовой связи не относится, и останавливаться на нем подробнее мы также не будем.

3.5. Фрод в сотовой связи

Фрод (английский термин *fraud* – буквально *обман, мошенничество*) в применении к сотовой связи, по определению, – это деятельность, направленная на использование услуг сотовой связи без надлежащей их оплаты.

Мошенничество, к сожалению, в тех или иных проявлениях встречается во всех областях человеческой деятельности, в том числе и в области связи. Но особенность сотовой связи заключается в том, что наличие радиоканала на участке от подвижной станции до базовой в некотором смысле облегчает доступ посторонних в канал связи и, что возможно даже более существенно, делает его незаметным, в отличие от связи проводной. Поэтому

соблазн сжульничать оказывается очень большим, и по мере развития и распространения самой сотовой связи проявляется и сопутствующий ей фрод. Широкое распространение последнего можно даже считать в каком-то отношении признаком состоятельности и перспективности бизнеса сотовой связи.

Здесь вполне может возникнуть вопрос: а нужно ли вообще рассказывать и писать о фроде? Не получится ли от этого вреда больше, чем пользы? По нашему мнению, нет, не получится, и даже совсем наоборот: польза будет многократно превосходить возможный вред, поскольку фродстеры и так технически грамотны, инициативны и отлично информированы, а обстановка открытости и общественного внимания никак не может способствовать успеху их неблаговидных дел. Практически таково же, например, и мнение специалистов, занимающихся вопросами безопасности в компьютерных сетях [35]: «...разработчики сетей, стремящиеся поддержать безопасность, стоят перед беспокоящим их парадоксом: открыто обсуждая дефекты сетей, они делают потенциально более известными «дупла» в них нарушителям и облегчают им несанкционированный доступ. Однако замалчивание дыр в системах гораздо хуже, так как создает опасную иллюзию благополучия». В соответствии с приведенными соображениями мы и включили в книгу настоящий раздел, ограничив его по степени глубины и подробности изложения общеобразовательным уровнем.

Формы, в которых проявляется фрод, весьма разнообразны. Тут и злоупотребление доверием компании-оператора при подписке (при заключении договора на пользование услугами сотовой связи), в том числе с перепродажей эфирного времени и с использованием особенностей условий роминга; и различного рода переделками абонентских аппаратов, подделки идентификаторов и паролей с использованием весьма тонких особенностей работы сетей сотовой связи, включая опять же условия роминга; и обычные кражи абонентских аппаратов с различными вариантами их последующего использования, в том числе с привлечением дилеров для повторной продажи краденых или в каком-то ином отношении «грязных» аппаратов. Мы кратко рассмотрим основные варианты проявления фрода, опираясь на известные публикации [88, 139, 120, 157, 130, 94, 112 и др.], и принимая следующую простую классификацию разновидностей фрода: подписной фрод; технический фрод; обычные кражи.

Подписной фрод, или фрод при подписке (*subscription fraud*), сводится фактически к злостным неплатежам при интенсивном использовании сотового телефона. При этом потенциальный клиент уже при подписке на услуги сотовой связи имеет намерение эти услуги не оплачивать. Дальнейшее поведение такого клиента зависит от ситуации и от степени его изобретательности. В простейшем случае он сразу же начинает интенсивно пользоваться сотовой связью, возможно, с перепродажей эфирного времени, причем особой популярностью пользуются более дорогие между-

городные и международные вызовы, а по истечении отчетного периода, например месяца, исчезает, уходя от оплаты.

Если известно, что в течение одного или двух первых месяцев обслуживания компания-оператор внимательно следит за новыми абонентами и расходуемым ими эфирным временем, то на первых порах они могут вести себя сдержанно, но затем в течение следующего месяца наверстать упущенное. Фродстеры активно используют такие обстоятельства, как массовые сезонные миграции населения, продажу абонентских аппаратов в кредит и т.п.

Надо сказать, что далеко не все страны публикуют подробную информацию о размахе и структуре фрода. Сравнительно полные данные имеются по США, и этим примером мы проиллюстрируем наше изложение (рис. 3.3). Потери от подписного фрода составляли до недавнего времени около 30 % общих потерь от фрода, но наблюдается тенденция к увеличению их доли до 35...40 %. Общие потери от фрода поглотили в 1996 г. около 5 % дохода операторов сотовой связи США (1080 млн. долл. потерь, при общем доходе 21 млрд. долл.); в абсолютных цифрах эти потери будут расти вплоть до 2000 г., но для их доли по отношению к общему объему доходов (revenue) прогнозируется снижение до 3,2 % в 2000 г.

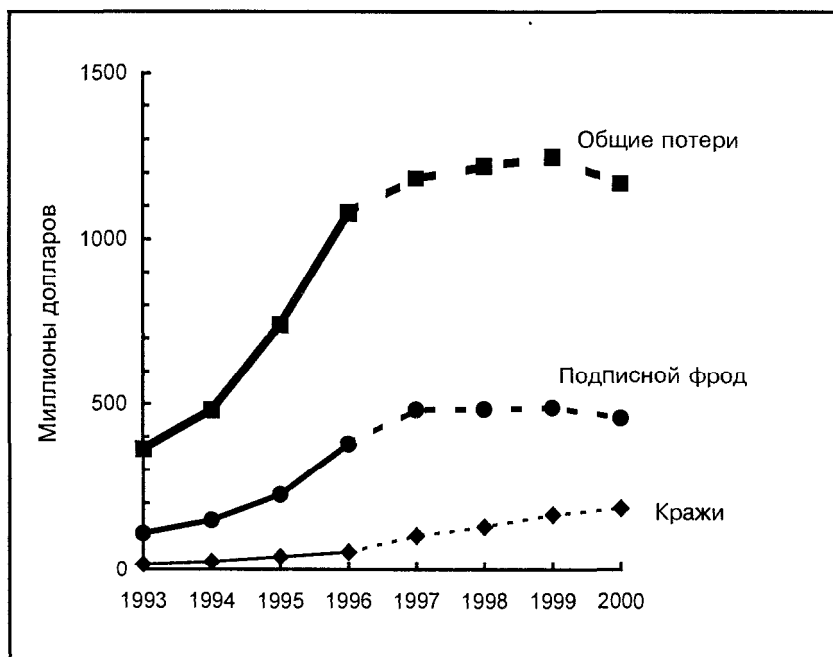


Рис.3.3. Абсолютные потери от фрода (США; данные компании Yапkee Group [112]; 1997 г. и далее – прогноз)

Технический фрод – наиболее разнообразная и обширная область фрода, на его долю почти полностью приходятся остальные 60...70 % потерь дохода сотовых операторов. Технические фродстеры инициативны и находчивы и стремятся как можно быстрее отработать любые изменения ситуации. Мы не ставим своей задачей описание или даже перечисление всех разновидностей технического фрода, а ограничимся тремя хрестоматийными примерами, позволяющими получить представление о рассматриваемом явлении.

Первый пример – переделка (английский термин *tumbling* – *переброска, опрокидывание*) электронных серийных номеров в абонентских аппаратах. Этот вариант фрода был характерен для ранних аналоговых стандартов сотовой связи, с их предельно простой процедурой аутентификации, и был широко распространен в США. Он учитывал, в частности, то обстоятельство, что при автоматическом роинге первый исходящий вызов вновь появившегося номера проходил без полной проверки, а электронный серийный номер при этом фиксировался, и полная проверка состоятельности номера производилась уже после завершения вызова. Если проверка приводила к отрицательному результату, то второй вызов с аппарата с тем же электронным серийным номером уже не выполнялся. Суть фрода заключалась в такой доработке абонентского аппарата, что при каждом следующем вызове он передавал новый электронный серийный номер, т.е. вызывающий абонент воспринимался как новый номер, который получал возможность проведения разговора без полной проверки, и, естественно, без последующей оплаты.

Второй пример – клонирование (от биологического термина *клон*, означающего потомство растительного или животного организма, образовавшееся путем вегетативного размножения), или явление «сотовых двойников». При этом в дублирующий абонентский аппарат закладываются те же числа-пароли (например, электронный серийный номер или идентификационный номер абонентского аппарата), которые используются при аутентификации абонента основного аппарата, и за вызовы с дублирующего аппарата расплачивается владелец основного. Главной, и непростой, задачей при этом является получение чисел-паролей аппаратов реально существующих абонентов. Помимо очевидных «агентурных» методов (покупка или воровство у поставщиков или дилеров) здесь используются и методы чисто технические – извлечение этих данных из эфира с помощью достаточно сложных сканирующих приемников. Этот пример наглядно иллюстрирует совершенство и изощренность «фродового бизнеса».

Третий пример – использование незаконного сотового аппарата типа клона для коммерческой связи, скажем для продажи дорогих международных вызовов. Схема может быть, например, такой: один участник операции из будки-временки «международной телефонной связи» с обычного телефонного аппарата вызывает незаконный сотовый аппарат партнера и ставит ему задачу; парт-

нер с сотового аппарата вызывает нужного зарубежного абонента и организует конференц-связь, т.е. совместный телефонный разговор трех абонентов. В результате абонент-заказчик проводит заказанный сеанс связи, а оплата начисляется на счет фактического хозяина использованного номера сотового телефона.

Разумеется, приведенными примерами варианты фрода не исчерпываются. Но и эти примеры позволяют представить, какой ущерб может быть нанесен компаниям-операторам и насколько непросто противостоять фроду, особенно с учетом необходимости в возможно меньшей степени причинять неудобства законным абонентам. Фактически между фродстерами, с одной стороны, и производителями аппаратуры и операторами сотовой связи при относительно пассивном участии абонентов, с другой, идет непрерывная и жесткая борьба, которая не приносит ни одной из сторон полной победы, но позволяет поддерживать известное динамическое равновесие, с эпизодическими отклонениями в одну или другую сторону.

Кражи абонентских аппаратов наносят ущерб прежде всего непосредственно пострадавшим абонентам и уже во вторую очередь – компаниям-операторам, как повод для дополнительного потока неоплачиваемых вызовов и источник готовых аппаратов для технического фрода. При этом прямое бесплатное пользование украденным аппаратом возможно только в том случае, когда он не защищен индивидуальным паролем абонента, и лишь до тех пор, пока соответствующий номер не будет заблокирован центром коммутации по заявлению потерпевшего. Хотя доля потерь от краж аппаратов относительно невелика, все же она заметна и имеет, по крайней мере для США, тенденцию к увеличению (рис. 3.3). Сошлемся также на пример Англии: здесь при семи миллионах абонентов ежемесячно крадут 12...16 тысяч аппаратов, т.е. за год жертвами краж становятся около 2,5 % абонентов, причем в центрах крупных городов более 40 % взломов автомашин производится ради кражи оставленных в салонах сотовых аппаратов. Общие же потери от фрода в Англии оцениваются величиной порядка 150 млн. долл. США в год (1995 г.).

Каковы меры борьбы с фродом, и нужно ли вообще с ним бороться? На вторую часть этого вопроса мы фактически уже ответили выше, упомянув о динамическом равновесии в борьбе фродстеров с бизнесменами сотовой связи: бороться с фродом необходимо, в противном случае многократное возрастание убытков неизбежно. Что же касается мер борьбы, то они не менее разнообразны, чем проявления самого фрода.

В отношении технического фрода, и конкретно – клонирования абонентских аппаратов, прежде всего нужно отметить введение усовершенствованной процедуры аутентификации, о которой мы уже говорили (раздел 2.3.3) и которая удобно реализуется в цифровых стандартах. Во всяком случае, извлечение из эфира информации, необходимой для клонирования, оказывается при этом невозможным. Весьма перспективным представляется прием, из-

вестный под названием «радиочастотные отпечатки пальцев» (*RF fingerprinting*), при котором для каждого абонентского аппарата измеряются и запоминаются в соответствующей базе данных такие тонкие характеристики, как небольшие (в пределах допусков) отклонения от номинала используемых частот, параметров модуляции и т.п. Реализация метода технически сложна, но и вероятность подделки такого радиочастотного «портрета» столь же мала, как и обычных отпечатков пальцев; использующие этот принцип системы уже находят практическое применение. Возможно и использование иных методов, например систем распознавания голоса абонента, наборов ограничений по времени вызова и месту нахождения конкретных абонентов и других, в том числе в различных сочетаниях.

В сдерживании подписного фрода основными моментами являются контроль пунктов продажи, проверка кредитоспособности новых абонентов, оперативный обмен информацией между подразделениями компаний-операторов и между разными компаниями. Последнее особенно актуально в связи с развитием роминга. Международной Ассоциацией операторов стандарта GSM (GSM MoU Association) рекомендовано, в частности, чтобы обмен информацией между операторами по ромингу осуществлялся в течение 36 часов.

Оперативный обмен информацией весьма важен и в борьбе с использованием краденых, неисправных или не сертифицированных аппаратов. Стандартом GSM с этой целью предусмотрено наличие в каждой сети соответствующей базы данных – регистра идентификации аппаратуры (Equipment Identification Register – EIR), а при штаб-квартире Ассоциации GSM MoU в Дублине (Ирландия) создана всемирная база данных – Центральный регистр идентификации аппаратуры (CEIR – Central EIR).

Следует отметить, что по мере развития сотовой связи очень быстрые эволюции претерпевает и фрод. В частности, введение совершенной процедуры аутентификации резко уменьшает возможность клонирования абонентских аппаратов, и в стандарте GSM, например, случаев клонирования аппаратов или копирования SIM-карт не известно, но зато возник черный рынок SIM-карт и резко возрос подписной фрод, особенно в связи с международным ромингом. При этом «изолированные» страны, где роминг развит слабее, страдают от этого вида фрода в значительно меньшей степени, чем страны, находящиеся в густом окружении соседей с тем же стандартом GSM, а вновь выходящие на рынок операторы страдают больше, чем операторы «старые».

Большое значение для успешной борьбы с фродом имеют разработка и принятие соответствующих законодательных актов, причем законы должны быть достаточно разносторонними и действенными, они должны учитывать исключительно высокие темпы развития как мобильной связи, так и разновидностей фрода. По-видимому, на сегодня более или менее соответствующие требованиям времени законы существуют только в США.

В частности, раздел 18 свода федеральных законов США – Кодекса Соединенных Штатов (United States Code – USC) – содержит такие три статьи:

- статья 1028 – мошенническое использование идентификации;
- статья 1029 – мошенническое использование устройств доступа;
- статья 1030 – мошенническое использование компьютеров.

В статью 1029 в октябре 1994 г. были внесены поправки, специально учитывающие фрод в сотовой связи. Статья 1029 с поправками, озаглавленная «Фрод и связанная с ним деятельность в сочетании с устройствами доступа», устанавливает в числе прочего наказания в виде штрафов и/или тюремного заключения на срок до 10...20 лет за мошенничество в области телекоммуникаций, в частности за умышленное и с целью фрода использование, производство, обладание или хранение соответствующим образом модифицированной аппаратуры и сканирующих приемников, а также устройств или программного обеспечения, используемых для доработок аппаратуры электросвязи с целью получения несанкционированного доступа к телекоммуникационным услугам.

Показательно внимание, которое уделяют борьбе с фродом и защите передаваемой по сотовой связи информации компании-производители аппаратуры и компании-операторы. Во многих из них учреждены такие должности, как вице-президент по охране доходов, вице-президент по предотвращению фрода и управлению, руководитель службы безопасности и борьбы с высокотехнологичными преступлениями, руководитель антифродовой службы, инженер-консультант по технической безопасности и т.п. Борьбе с фродом посвящаются тематические конференции, статьи и специализированные журналы, разрабатываются и принимаются специальные программы по борьбе с фродом; в Ассоциации GSM MoU вопросами фрода занимается отдельная рабочая группа.

Заканчивая настоящий раздел, мы должны констатировать, что для успешной борьбы с фродом требуются объединение усилий компаний-производителей, компаний-операторов и законодателей и их совместная систематическая работа.

3.6. Биологическая безопасность

Вопрос о биологической безопасности сотовой связи является, вероятно, в каком-то смысле наиболее актуальным из всех вопросов, затрагиваемых в настоящей книге. Во всяком случае, он едва ли оставит абсолютно равнодушным хотя бы одного человека из тех, кому эта книга попадет на глаза. И это вполне естественно, поскольку в наше время всем известно, что электромагнитное излучение, особенно СВЧ, может быть далеко не безвредным, а радиопередатчик абонентского аппарата сотовой связи работает

непосредственно около уха, в нескольких сантиметрах от головного мозга. Поэтому не приходится удивляться, что проблеме биологической безопасности уделяют внимание и средства массовой информации, и специалисты, ей посвящаются научные исследования, специальные публикации и тематические конференции.

Известная осторожность при пользовании сотовой связью, безусловно, необходима, по крайней мере в некоторых ситуациях. Например, излучение сотового телефона может нарушать работу электрокардиостимуляторов и слуховых аппаратов, сотовым телефоном нельзя пользоваться в самолетах, с большой осмотрительностью – на химических заводах и в местах проведения взрывных работ и т.п. Однако когда говорят о биологической безопасности сотовой связи, то в первую очередь все же имеют в виду влияние электромагнитного излучения телефона на организм обычного здорового человека, и именно об этом у нас пойдет речь ниже.

На сегодняшний день проблема биологической безопасности сотовой связи, в указанном выше смысле, изучена далеко не полностью, и интенсивные исследования в этой области продолжаются. Тем не менее уже имеющиеся данные позволяют с большой долей определенности утверждать, что сотовая связь практически безопасна для здоровья человека или, в более осторожных терминах, что нет конкретных оснований для заявлений, что сотовая связь может причинить здоровью вред. Подтверждением этому являются по крайней мере три следующие обстоятельства:

- За 15 лет достаточно широкого распространения сотовой связи, в том числе в Америке, Японии, Европе, не зафиксировано ни одного случая явного ущерба здоровью, непосредственно связанного с использованием сотовых телефонов. А в цивилизованных странах люди знают цену своему здоровью!
- Существуют четкие нормы биологической безопасности на допустимое электромагнитное излучение, которым должна соответствовать и аппаратура сотовой связи.
- Известны результаты специальных исследований, которые показывают, что практически допустимые нормы безопасности выполняются в сотовой связи с хорошим запасом.

А теперь расскажем об этом подробнее, опираясь на имеющиеся результаты и публикации [141, 62, 65, 66, 164 и др.].

Начнем с норм безопасности на электромагнитное излучение. Такие нормы существуют во многих странах, и устанавливаются они в соответствии с одними и теми же соображениями: допустимый предел облучения должен быть с достаточно хорошим запасом (например, в 50 раз) ниже того порога, при превышении которого в организме человека происходят заметные изменения. В рамках этого единого методического подхода конкретные нормы могут различаться как по количественным характеристикам, так и по условиям применения или ситуациям, к которым они относятся, например нормы могут соответствовать:

- контролируемым условиям работы (нормы «для профессионалов») или неконтролируемым условиям (нормы «для населения») – по стандарту США допустимые пределы облучения в первом случае в 5 раз выше, чем во втором;
- различным интервалам усреднения при оценке допустимого среднего уровня облучения; при этом если время облучения больше интервала усреднения, то допустимый средний уровень не должен превышать для любого интервала времени, равного интервалу усреднения, в пределах времени облучения; если же время облучения меньше интервала усреднения, то допустимый средний уровень облучения пропорционально увеличивается по отношению к заданному предельному;
- различным объемам ткани или телу человека в целом;
- нормы могут зависеть от частоты или могут относиться к различным физическим величинам.

Последний момент поясним чуть подробнее. Обычно нормы безопасности устанавливают предел для *плотности потока мощности* (Вт/см^2 или мВт/см^2), или для так называемого *коэффициента удельного поглощения* (*Specific Absorption Rate* – SAR, Вт/кг или мВт/г). SAR, по определению, – это производная по времени от энергии электромагнитного поля, поглощаемой единицей массы (или рассеиваемой в ней) в объеме ткани тела заданной формы и плотности.

Мы не будем перечислять всех характеристик имеющихся стандартов, а приведем по четырем стандартам выборочные данные, непосредственно относящиеся к сотовой связи (табл. 3.1).

Первое, что можно констатировать по данным приведенной таблицы, – это достаточная близость допусков разных стандартов. Сказанное справедливо не только для SAR, но и для плотности потока мощности, хотя последнее и может поначалу показаться не очевидным; однако если российскую норму $0,01 \text{ мВт/см}^2$ пересчитать в соответствии с правилами, принятыми в стандарте США, на интервал усреднения 30 минут, что более соответствует условиям применения сотовой связи, то получим $0,4 \text{ мВт/см}^2$, а это практически совпадает с $0,5 \dots 0,6 \text{ мВт/см}^2$ стандарта США для диапазона 800...900 МГц.

Второй вывод из данных таблицы: если в российском стандарте задан только предел для плотности потока мощности, то в остальных стандартах основной является норма для SAR. И это весьма существенно, поскольку относительно простое измерение плотности потока мощности возможно лишь в дальней зоне антенны, на расстоянии не менее длины волны от нее, а попытки опереться на результаты некорректно выполненных измерений в ближней зоне приводят к количественно неверным и даже абсурдным результатам [65, 66]. Поэтому, хотя измерения SAR тоже очень непросты, проверка биологической безопасности сотовых телефонов основывается именно на них.

Таблица 3.1. Нормы безопасности на электромагнитное излучение по четырем основным стандартам [135, 132, 149,131, 113, 66]

Страна или регион (стандарт)	Плотность потока мощности, мВт/см ²	SAR, мВт/г
США ¹ (ANSI/IEEE C95.1-1992)	f (МГц)/1500	1,6
Западная Европа ² (ENVSO 166-2 – проект, 1995)	-	2
Япония ³	-	8
Россия ⁴ (ЭМИ РЧ. Сан. правила и нормы. 1996)	0,01	-
<p>Примечания.</p> <p>1. Для диапазона частот 300...3000 МГц; неконтролируемые условия; интервал усреднения 30 минут; предел для SAR относится к локальному пространственному максимуму при усреднении по 1 г ткани в форме куба; предел для плотности потока мощности зависит от частоты, и в диапазоне 800...900 МГц составляет 0,5...0,6 мВт/см².</p> <p>2. Для диапазона частот 30...6000 МГц, нормы для населения; интервал усреднения 6 минут, усреднение по любым 10 граммам ткани в форме куба.</p> <p>3. Интервал усреднения 6 мин; усреднение по 1 г ткани.</p> <p>4. Интервал усреднения 20 час.</p>		

И тут мы переходим к следующему вопросу: каким образом практически оценивается SAR – коэффициент удельного поглощения энергии электромагнитного поля в теле человека? Оценка SAR производится с использованием моделей тела человека – математических и физических. Эти модели достаточно детально воспроизводят тело человека, с учетом составляющих его тканей (мышцы, кости, мозг, кровь, печень и т.п.) и характерных параметров последних (диэлектрическая проницаемость, проводимость); в некоторых исследованиях модель непосредственно воспроизводит тело подопытного добровольца [113]. При использовании математической модели SAR оценивается расчетным путем, в результате чего получается картина пространственного распределения SAR, по которой находятся участки с максимумами, а также среднее значение SAR для тела в целом. В физической модели, создаваемой из материалов с соответствующими характеристиками и воспроизводящей тело человека или его часть в натуральную величину, производятся прямые измерения напряженности электрического поля в малой полости, которая создается в выбранном месте модели и в которую помещается датчик измерительного прибора. В таких экспериментах используются реальные абонент-

ские аппараты, работающие в обычном режиме и размещаемые в нужном ракурсе непосредственно около уха модели. Опыт показывает, что результаты, получаемые на математических и физических моделях, хорошо согласуются между собой.

В качестве примера в табл. 3.2 и на рис. 3.4 мы приводим некоторые результаты измерений, выполненных на физических моделях. Следует отметить, что все эти результаты относятся к выходной мощности аппарата 600 мВт при непрерывном излучении (аналоговый стандарт AMPS). При работе в цифровом стандарте D-AMPS, как это следует из сказанного в разд. 2, средняя излучаемая мощность снижается втрое. Кроме того, абонент практически никогда не говорит полчаса подряд – максимум 5...10 минут, обычно даже меньше. Наконец, поскольку мощность излучения абонентского аппарата регулируется в ходе сеанса связи, он редко работает с максимальной мощностью, как правило, его мощность меньше максимальной в 3...5 раз или более. Поэтому в среднем существует еще более чем десятикратный запас по сравнению с результатами, приведенными в табл. 3.2 и на рис. 3.4.

Таблица 3.2. Значения SAR, полученные из измерений на физических моделях головы человека (выходная мощность аппарата 600 мВт) [135]

Частота, МГц	Максимум SAR, мВт/г	Область расположения максимума	Авторы (год)
815 . 855	1,0 ..2,1	Мозг	Cleveland, Athey (1989)
900	3,6	Мозг	Kuster, Balzano (1992)
835	1,1...1,8	Ухо	Balzano et al. (1995)
835	0,4.. 0,8	Мозг	Anderson, Jouner (1995)

Таким образом, нормы безопасности, устанавливаемые существующими стандартами, в частности, стандартом США [86] и учитывающие практически все виды влияния электромагнитного излучения на человека (термическое, канцерогенное, нейрофизиологическое, влияние на слух, кровь и др.), существующими аппаратами сотовой связи выполняются. Поэтому мы не можем не присоединиться к общему выводу обзорного доклада на специализированной конференции по биологической безопасности сотовой связи – выводу предельно дипломатичному, но абсолютно недвусмысленному [135]: «С учетом неопределенностей, а также того факта, что пороги являются консервативными оценками для минимальных биологических воздействий, соответствующих рассматриваемым значениям SAR, имеющиеся данные не представляют прямых доводов в отношении надвигающейся угрозы здоровью»

людей со стороны спорадического или кратковременного мало-мощного радиочастотного или СВЧ облучения».

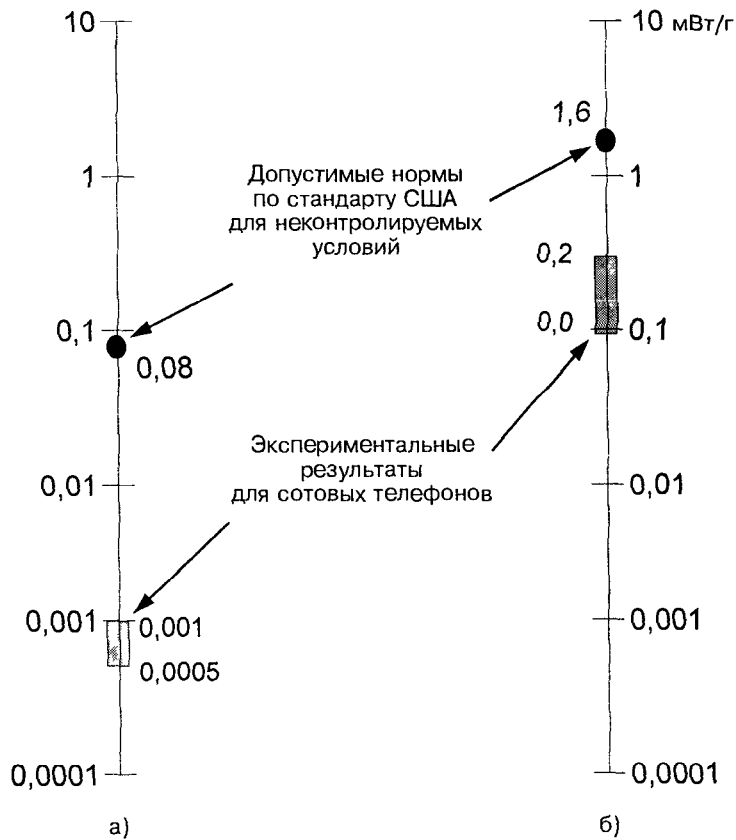


Рис.3.4. Значения SAR, полученные с помощью математической модели всего тела и физической модели головы (частота 835 МГц; испытано три модели аппаратов; выходная мощность 600 мВт) [113]:
 а) SAR – в среднем для всего тела;
 б) SAR – в области пространственного максимума

Исчерпав по существу изложенным основное содержание проблемы биологической безопасности сотовой связи, по крайней мере в том приближении, которое принято нами в рамках этой книги, остановимся еще на вопросе отношения общества к сотовому телефону в связи с возможным риском при использовании последнего. Этот вопрос в числе прочих также был предметом обсуждения на упоминавшейся конференции по биологической безопасности сотовой связи [154], и изложенный там опыт США представляется небезынтересным. Этот опыт, если говорить коротко, сводится к тому, что, судя по многим публикациям в средствах массовой информации и по результатам опросов общественного мнения, риск от регулярного пользования сотовым телефоном нередко преувеличивается. В связи с этим предлагаются такие конкретные шаги:

- продолжение многосторонних исследований по биологической безопасности сотовой связи как в естественных условиях (*in vivo* – буквально в жизни, в теле), так и в лабораторных (*in vitro* – в пробирке, в колбе);
- широкая объективная информация для населения, в том числе в средствах массовой информации;
- разработка критериев сопоставления риска от сотовых телефонов с риском от других атрибутов современной жизни, более привычных и более доступных для большей части населения.

Последнее, о чем мы считаем нужным упомянуть в этом разделе и что не связано с опасностью (или безопасностью) электромагнитного излучения, но нередко рассматривается в публикациях под характерными заголовками типа: «Осторожно: сотовый телефон!», – это опасность ведения разговора по сотовому телефону за рулем. Эта опасность всем очевидна, предупреждения о ней включаются практически во все инструкции к абонентским аппаратам, тем не менее она остается настолько серьезной, что в некоторых случаях ее сравнивают с воздействием алкогольного опьянения [76]. Можно спорить, достаточны ли основания для постановки вопроса о запрете использования сотовой связи за рулем, но бесспорно, что это как раз тот случай, когда строгое соблюдение элементарных правил безопасности (использование комплекта «свободные руки», остановка на обочине на время разговора) вполне себя оправдывает.

Глава 4 СОТОВАЯ СВЯЗЬ В СОПОСТАВЛЕНИИ С ДРУГИМИ ВИДАМИ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ

4.1. Вводные замечания

До сих пор, в первых трех разделах книги, мы говорили только о сотовой связи и рассмотрели многие из относящихся к ней вопросов. Однако сотовая связь – не единственный вид подвижной связи, известны и другие ее виды:

- транковая связь;
- персональный радиовывоз;
- мобильная спутниковая связь;
- беспроводной телефон.

Все эти варианты подвижной связи мы рассмотрим далее в настоящем разделе. Одновременно с беспроводным телефоном мы коснемся построения локальных беспроводных сетей. Мы остановимся также на системе PHS – своеобразном сочетании беспроводного телефона и сотовой связи.

Степень подробности нашего изложения будет относительно невелика, в большинстве случаев мы не будем рассматривать технических деталей и конструктивных особенностей различных вариантов систем, а иногда даже не будем перечислять конкретные системы по их наименованиям. Наша задача будет состоять в том, чтобы пояснить принцип действия других видов подвижной связи и сопоставить их с сотовой связью, по возможности четко выделив сравнительные характеристики, относительные достоинства и недостатки, с тем чтобы иметь возможность определить роль и место каждой из систем на рынке мобильной связи и в какой-то мере оценить возможные пути эволюции.

4.2. Транковая связь

Системы транковой связи [42, 78, 40, 29 и др.] до некоторой степени близки к сотовым: это также системы наземной подвижной связи, в первую очередь – радиотелефонной, обеспечивающие неограниченную мобильность абонентов в пределах достаточно большой зоны обслуживания. Основное отличие состоит в том, что транковые системы проще и предоставляют абонентам меньший набор услуг, но за счет этого они дешевле сотовых. Транковые системы имеют значительно меньшую емкость,

чем сотовые, и принципиально не могут стать системами массовой мобильной связи.

Название транковой связи происходит от английского *trunk* (ствол) и отражает то обстоятельство, что ствол связи в такой системе содержит несколько физических (как правило, частотных) каналов, каждый из которых может быть предоставлен любому из абонентов системы; эта ситуация в точности совпадает с имеющейся в сотовой связи в пределах одной соты. Указанная особенность отличает системы транковой связи от предшествовавших ей систем двусторонней радиосвязи, в которых каждый абонент имел возможность доступа лишь к одному каналу, но последний должен был поочередно обслуживать ряд абонентов.

Как нетрудно убедиться, с учетом изложенных в разделе 2.5 принципов расчета систем массового обслуживания системы транковой связи в сравнении с такими более примитивными системами обладают значительно более высокой емкостью (пропускной способностью) при тех же показателях качества обслуживания. Транковую связь называют также *транкинговой* связью или просто *транкингом*. В отечественной литературе нередко используется наименование *радиальные* или *радиально-зональные* системы связи; последнее относится к случаю, когда система состоит из нескольких зон, что соответствует нескольким ячейкам (сотам) системы сотовой связи.

Если использовать аналогию с сотовой связью, то в простейшем случае система транковой связи – это одна ячейка сотовой системы, но при несколько специфическом наборе услуг. Сотовая система всегда строится в виде множества ячеек, замыкающихся на общий центр коммутации, с передачей обслуживания из ячейки в ячейку по мере перемещения абонента. При необходимости наращивания емкости сотовой системы производится дополнительное дробление ячеек с соответствующей модификацией частотного плана (распределения частот по ячейкам). В системе же транковой связи, заведомо идущей на функционирование с ограниченной емкостью, обычно стремятся предельно увеличить зону действия. Практически радиус ячейки транковой связи может достигать 40...50 км и более. Отсюда с неизбежностью вытекает большая по сравнению с сотовой связью мощность передатчика, большой расход энергии источника питания, большие габариты и масса абонентских терминалов.

Даже если система транковой связи строится в виде нескольких ячеек (многозональная система), это делается в первую очередь ради расширения зоны действия, а не ради повышения емкости, и размеры ячеек (зон) остаются достаточно большими. Централизованное управление совокупностью зон остается при этом ограниченным, равно как и передача обслуживания из зоны в зону, которая, если она вообще реализуется, приводит к кратковременному прерыванию связи. Если же в погоне за емкостью пойти на дробление ячеек с уменьшением их размеров, с применением принципа повторного использования частот и с передачей

обслуживания между ячейками, то мы как раз и приходим к тому, что существует сегодня под названием системы сотовой связи. Основное применение систем транковой связи – корпоративная (служебная, ведомственная) связь, например оперативная связь пожарной службы с числом выходов (каналов) «в город», значительно меньшим числа абонентов системы.

Для упрощения и удешевления системы в транковой связи нередко используется полудуплексный режим работы, при котором один и тот же физический канал поочередно используется для связи в прямом и обратном направлениях. Наиболее распространенный метод множественного доступа – с разделением каналов по частоте (FDMA), хотя известны и примеры с использованием временного разделения (TDMA).

Для повышения пропускной способности обычно накладываются ограничения на длительность разговора, а специфика корпоративной связи находит отражение в системе приоритетов пользователей, учитываемых при предоставлении канала связи в условиях очереди, и в объединении абонентов в группы с возможностью диспетчерского вызова одновременно всех абонентов группы. Та же специфика обуславливает более высокие в среднем по сравнению с сотовой связью требования к оперативности и надежности установления связи. Кроме информации речи в системах транковой связи возможна передача и некоторых других видов информации, в частности, цифровой – управления, телеметрии, охранной сигнализации и др.

Среди протоколов (стандартов) транковой связи наиболее известны открытые европейские протоколы – MPT 1327, TETRA и специализированные (лицензируемые) протоколы – LTR, SmartNet, EDACS и др. Открытые протоколы не защищены патентами, и соответствующее им оборудование производится многими компаниями. Эти протоколы допускают внесение изменений, связанных, например, с национальными особенностями отдельных стран. Аналоговый протокол MPT 1327 с уточнениями MPT 1343, MPT 1347, MPT 1352, MPT 1318, MAP 27 широко распространен в Европе.

Концепцией транкинговой связи России он рекомендован для создания соответствующих отечественных национальных систем. Новый цифровой протокол TETRA (Trans European Trunked Radio) должен вводиться с 1997 г.; он предназначен, в частности, для корпоративных сетей полиции и таможенных служб и должен сменить протокол MPT с обеспечением сопряжения и преимуществности соответствующих систем транковой связи. К категории транковых систем по сути относится и известная отечественная система «Алтай», в свое время первая автоматическая система дуплексной радиотелефонной связи, созданная в 60-х годах и прослужившая около 30 лет. Современные транковые системы работают в диапазонах частот 136...174, 330...380, 403...480, 806...825, 851...870, 896...901, 935...940 МГц; характерные полосы частотных каналов составляют 12,5 или 25 кГц.

4.3. Персональный радиовывоз (пейджинг)

Системы персонального радиовывоза [56, 82, 37, 71, 3, 89 и др.], или пейджинговые системы (от английского *paging* – вызов), – это системы односторонней мобильной связи, обеспечивающие передачу коротких сообщений из центра системы (с пейджингового терминала) на миниатюрные абонентские приемники (пейджеры). В отечественной литературе для них иногда используются также наименования «системы поискового вызова» или «системы радиопоискового вызова».

В простейшем случае система персонального радиовывоза состоит из пейджингового терминала, базовой станции и пейджеров. Терминал, включающий пульт оператора вызова и контроллер системы, выполняет все функции управления системой. Базовая станция состоит из радиопередатчика и антенно-фидерного устройства и обеспечивает передачу пейджинговых сигналов на всю зону действия системы, радиус которой может составлять до 100 км. Пейджеры осуществляют прием тех сообщений, которые им адресованы. В более сложных случаях система персонального радиовывоза может иметь несколько радиопередатчиков, по возможности равномерно распределенных в пределах зоны действия, что позволяет более надежно обеспечить связью всю зону.

В системах персонального радиовывоза могут передаваться сообщения четырех типов: тональные, цифровые, буквенно-цифровые, речевые. Тональные сообщения были единственным типом сообщений в ранних моделях пейджеров, и смысл их мог быть, например, таким: «Позвоните в офис и узнайте новости!» Цифровое сообщение может содержать номер телефона, по которому следует позвонить. Наиболее распространенным типом сообщений является буквенно-цифровое, оно может содержать практически любой текст длиной до 100...200 и более символов. Цифровое или буквенно-цифровое сообщение отображается на дисплее пейджера, который может иметь от одной до восьми строк, до 12...20 символов в строке. Длинные сообщения отображаются по частям. Передача речевых сообщений широкого распространения пока не получила. Вызов абонента, т.е. адресация сообщения, может осуществляться одним из трех способов: индивидуально, нескольким абонентам (общий вызов) или группе абонентов (групповой вызов). В первом случае вызов адресуется конкретному абоненту по его индивидуальному номеру, во втором – нескольким абонентам с последовательной передачей их индивидуальных номеров, в третьем – вызов адресуется одновременно группе абонентов по общему групповому номеру. Сообщения, подлежащие передаче, также вводятся в систему одним из трех способов: голосом через телефонную сеть и оператора пейджинговой связи; через телефонную сеть с тональным набором – сообщение набирается на клавиатуре телефонного аппарата и про-

ходит сразу на пейджинговый терминал, минуя оператора; через телефонную сеть с персонального компьютера с набором сообщения на пульте компьютера и выходом также непосредственно на пейджинговый терминал.

Основная отличительная особенность пейджинговой связи, имеющая качественный характер, – асинхронная передача информации, т.е. работа вне реального времени, когда сообщение передается не в момент его выдачи отправителем, а в порядке очереди с аналогичными сообщениями других отправителей, хотя практически задержка от момента получения сообщения до его передачи в эфир невелика, обычно она не превышает нескольких минут. В сочетании с краткостью сообщений, передаваемых к тому же только в одну сторону, обеспечивается весьма эффективное использование канала связи, по меньшей мере на два порядка более эффективное (по числу обслуживаемых абонентов), чем в сотовой связи, даже с учетом повторного использования частот в последней. В результате пейджинг оказывается технически проще и экономичнее сотовой связи, т.е. в конечном итоге значительно дешевле для абонента. Это позволяет иногда, не без оттенка юмора, называть пейджинг «мобильной связью для бедных».

Помимо сообщений, предназначенных конкретным абонентам или группам абонентов, в пейджинговых системах обычно организуется своеобразный общий информационный канал, содержащий оперативную информацию о биржевых новостях, погоде, обстановке на дорогах и т.п. В пейджерах, как правило, предусматривается ряд дополнительных услуг: часы, календарь, возможность регулировки типа и громкости звукового сигнала, сохранение в памяти полученных ранее сообщений с возможностью их повторного чтения и др. Поскольку пейджер работает только в режиме приема, он весьма экономичен по питанию. Типовые габариты пейджера 80 × 50 × 20 мм, масса порядка 100 г. Используемые частотные диапазоны 135...175, 278...284, 322...328, 406...423, 435...480, 495...512, 929...932 МГц; полосы частотных каналов 12,5...25 кГц.

В последнее время стали появляться публикации о разработке пейджеров для двусторонней связи, обеспечивающих, в частности, передачу подтверждений о приеме сообщений, но пока не ясно, насколько широкое распространение они получат. Из стандартов пейджинговой связи упомянем POC SAG (Post Office Standardisation Advisory Group), разработанный в Англии в 1978 г. и рекомендованный МККР в 1982 г. в качестве первого международного стандарта, ERMES (European Radio Messaging System), включающий в числе прочего возможность роaming, и семейство протоколов FLEX (включая ReFLEX и InFLEXion), предусматривающее двустороннюю передачу данных и передачу голосовых сообщений.

Таким образом, системы персонального радиовызова предоставляют услуги удобного и относительно дешевого вида мобильной связи, но с существенными ограничениями: связь одно-

сторонняя, не в реальном времени и только в виде коротких сообщений. Поэтому пейджинг удачно дополняет сотовую связь, но никак не заменяет обычного телефонного общения, позволяющего вести диалог в реальном времени. Если сотовая связь – это в первую очередь мобильный телефон, то пейджинг можно назвать «мобильным телеграфом», но с передачей «телеграмм» в одном направлении. Системы персонального радиовызова получили в мире довольно широкое распространение – в целом того же порядка, что и системы сотовой связи, хотя их распространенность в разных странах существенно различается. В 1990 г. в мире использовалось 20 миллионов пейджеров, в 1997 г. – уже более 100 миллионов. В числе стран с интенсивным использованием пейджинга – Сингапур, Гонконг, Тайвань, США, Япония. В России в 1996 г. число абонентов пейджинговых систем составляло более 200 тысяч – примерно столько же, сколько и в сотовой связи.

4.4. Мобильная спутниковая связь

Системы мобильной спутниковой связи представляют сравнительно новый, очень мощный, гибкий и быстро развивающийся вид мобильной связи. Использование спутников в системах связи началось фактически сразу же после запуска первых ИСЗ в 1957...1958 гг., и до настоящего времени связь остается одной из основных областей их практического применения наряду с глобальной навигацией и разнообразными исследованиями Земли из космоса – от военной разведки до прогноза погоды и мониторинга природных ресурсов. Предложения об использовании спутников для связи высказывались и раньше. Например, Артур Кларк, в то время секретарь Британского межпланетного общества, в 1945 г. опубликовал статью с изложением идеи всемирной системы связи, использующей три спутника на геостационарной орбите [93]. Без сомнения, у всех на слуху названия серий спутников «Космос», «Горизонт», «Молния». Сегодня число таких названий составляет несколько десятков, и основные из них, относящиеся к связи, мы постараемся кратко охарактеризовать.

В зависимости от назначения спутниковые системы связи могут быть военными, гражданскими государственными (например, системы телевизионного вещания) или коммерческими, стационарными (фиксированными) или подвижными; связь может осуществляться в реальном времени или с задержкой, например с накоплением и последующим «сбросом» информации.

По типам используемых орбит ИСЗ спутниковые системы связи классифицируются следующим образом*):

*) Орбита ИСЗ в общем случае представляет собой эллипс, один из фокусов которого совпадает с центром Земли. Ближайшая к Земле точка орбиты называется *перигеем*, наиболее удаленная – *апогеем*. Частным случаем эллипса является окружность (круговая орбита). Наклонением орбиты называется двугранный угол, образу-

- высокоорбитальные, или геостационарные (GEO – Geostationary Earth Orbit) – с круговыми экваториальными орбитами высотой около 40 тыс. км; при этом период обращения спутника вокруг Земли равен 24 ч, т.е. спутник оказывается неподвижным относительно Земли: он постоянно «висит» над одной и той же точкой экватора,
- среднеорбитальные (MEO – Medium Earth Orbit) – с круговыми орбитами высотой порядка 10 тыс. км,
- низкоорбитальные (LEO – Low Earth Orbit) – с круговыми орбитами высотой 700..2000 км,
- высокоэллиптические (HEO – Highly Elliptical Orbit) – с вытянутыми эллиптическими орбитами, имеющими радиус перигея порядка тысячи километров и радиус апогея порядка одного или нескольких десятков тысяч километров.

Среднеорбитальные и низкоорбитальные системы иногда объединяют под общим названием низкоорбитальных; по типу используемых ИСЗ их разделяют также на большие (масса ИСЗ в пределах 500..2000 кг) и малые (50...100 кг).

Приведем некоторые примеры, не затрагивая систем военного назначения [93, 52, 77, 47, 39, 30, 90, 16 и др.].

Прежде всего, следует отметить большую группу систем стационарной (фиксированной) связи, использующих спутники на геостационарных или высокоэллиптических орбитах. Сюда относятся всемирная система INTELSAT, а также несколько региональных систем – европейская EUTELSAT, средневосточная ARABSAT и ряд других (все на геостационарных ИСЗ). В России (ранее в СССР) к этой же группе принадлежат системы на базе группировок высокоэллиптических спутников «Молния» и геостационарных «Радуга», «Горизонт», «Стационар», «Луч», «Экспресс», «Экран», «Галс». На основе последних были реализованы национальная система спутниковой связи и вещания «Орбита» и международная система спутниковой связи «Интерспутник». Крупнейшим оператором спутниковой связи в России является Государственное предприятие «Космическая связь» (ГПКС). Оно владеет пятью Центрами космической связи (телепортами), через которые осуществляется выход на спутники перечисленных выше группировок. ГПКС выполняет функции международного оператора спутниковой связи и является официальным представителем России в «Интелсате» и «Евтелсате». К этой же группе можно отнести интенсивно развивающиеся системы VSAT (Very Small Aperture Terminals – терминалы с очень малой апертурой антенны), предназначенные для бизнес-связи и отличающиеся сравнительно портативными терминалами с антеннами диаметром порядка 1...2 м, но требующие ис-

мый плоскостью орбиты и плоскостью экватора Земли. Орбита с нулевым наклоном называется *экваториальной*, ее плоскость совпадает с плоскостью экватора, орбита с наклоном 90 градусов – *полярная*, движущийся по ней спутник проходит точно над полюсами. Промежуточные орбиты называют *наклонными*, их наклонение лежит в пределах от 0 до 90 градусов. Орбиты с большим наклоном, порядка 70 градусов и более, иногда называют *приполярными*.

пользования высоконаправленных многолучевых антенн на борту ИСЗ.

Вторую группу в нашей условной классификации составляют системы мобильной связи на базе геостационарных и высокоэллиптических ИСЗ. Здесь прежде всего необходимо упомянуть систему INMARSAT (International Maritime Satellite Organization – Международная организация морской спутниковой связи), функционирующую с 1981 г. и использующую геостационарные спутники. Эта система помимо передачи сигналов аварийного оповещения обеспечивает мобильную связь, в основном на море, и имеет ряд модификаций, в том числе:

- Inmarsat-A – телефонная и телексная связь; параболические антенны диаметром порядка 1 м, направляемые на ИСЗ; передача речи – с аналоговой частотной модуляцией;
- Inmarsat-C – с 1991 г. – цифровая симплексная система передачи данных с накоплением и последующим «сбросом»;
- Inmarsat-M – с 1992 г. – цифровая система с портативными терминалами (масса около 10 кг, включая антенну), только телефонная связь;
- Inmarsat Aero-H – с 1991 г. – цифровая система телефонной связи для использования в воздушной навигации;
- Inmarsat-B – с 1993 г. – цифровая система, по назначению аналогичная Inmarsat-A, но более совершенная и сравнительно малогабаритная.

Россия (ранее СССР) активно участвовала в создании и использовании системы INMARSAT: был разработан комплекс спутниковой связи «Волна», включая сеть судовых станций «Волна-С», которые выходили на связь с абонентами на территории страны через соответствующие каналы ИСЗ «Горизонт». К этой же группе принадлежат североамериканская система OmniTRACKS (передача данных и определение местоположения), западноевропейская EUTELTRACKS (те же функции), австралийская Mobilesat (фиксированная и мобильная связь, передача речи, данных и факса), российская «Сокол» – все на геостационарных ИСЗ, а также разрабатываемая в России система «Марафон» с высокоэллиптическими спутниками «Маяк», предназначенная в первую очередь для связи в высоких широтах.

К третьей группе мы отнесем системы подвижной связи на базе больших низкоорбитальных (LEO) и среднеорбитальных (MEO) спутников с круговыми (реже – эллиптическими) орбитами. Разработка таких систем, рассчитанных на широкое коммерческое применение с использованием портативных (ручных) терминалов с ненаправленной антенной, не требующих, следовательно, слежения за ИСЗ, началась в самом конце 80-х годов, и ни одна из систем пока не запущена, но масштабы и степень продвинутой работы не оставляют сомнения в том, что по крайней мере некоторые из систем будут доведены до этапа эксплуатации, как и было задумано. Возможность реализации таких систем в значительной мере обязана развитию технологии, в частности совершенствова-

нию элементной базы и миниатюризации электронных устройств. Из числа систем этой группы можно отметить проекты США IRIDIUM, GLOBALSTAR, ODYSSEY, INMARSAT-P (все с круговыми орбитами), ELLIPSO (с эллиптическими орбитами), ARIES (с полярными орбитами), TELEDESIC (в системе предполагается использовать очень большое число спутников – 840), а также российские «Коскон», «Паллада», «Сигнал». В большинстве своем эти системы предусматривают также определение местоположения мобильных терминалов. В силу ряда причин системы этой группы представляют значительный практический интерес, и на некоторых из них мы подробнее остановимся ниже. В частности, благодаря меньшим высотам орбит они энергетически выгоднее, чем геостационарные и высокоэллиптические. По той же причине задержка сигнала в них в большинстве случаев не превышает 100 мс, что вполне приемлемо для организации двусторонней телефонной связи в реальном времени. Для сравнения: в геостационарных системах задержка достигает 250...270 мс, что считается недопустимым, так как приводит к заметному дискомфорту при телефонной связи.

Наконец, четвертая группа объединяет системы на основе малых низкоорбитальных (LEO) ИСЗ, предназначенные для работы в режиме электронной почты вне реального времени при малых скоростях передачи информации, т.е. для передачи данных с накоплением и последующим «сбросом», с задержкой во времени до нескольких часов. К этой группе относятся проекты США ORBCOM, STARNET, LEOSAT, итальянский проект TEMICON и российские «Гонец», «Курьер». Эти системы во многих случаях также обеспечивают определение местоположения абонентов.

Таким образом, как это видно из приведенных примеров, спутниковая связь вообще и подвижная спутниковая связь в частности – достаточно самостоятельные и весьма обширные области, со своей историей, своими техническими проблемами и достижениями, с большим числом участвующих в ее развитии и использовании национальных и международных компаний и организаций. Более или менее полное описание систем подвижной спутниковой связи далеко выходит за пределы возможностей настоящего издания, и требует отдельной книги или даже нескольких книг. Поэтому мы ограничимся в дополнение к уже приведенному обзору несколько более подробным описанием четырех систем – IRIDIUM, GLOBALSTAR, ODYSSEY, INMARSAT-P (ICO) [173, 84, 7, 129 и др.]. Выбор именно этих систем, место которых среди других систем спутниковой связи ясно из предшествующего изложения, обусловлено продвинутой их разработки и известной коррелированностью с системами сотовой связи, как по некоторым техническим особенностям построения, так и по возможностям применения, и ниже мы постараемся пояснить это подробнее.

В табл. 4.1 представлена сводка основных характеристик указанных четырех систем. Из данных таблицы видно, что все четыре системы используют ИСЗ на круговых орбитах, но две из них, IRIDIUM и GLOBALSTAR, – на низких орбитах 780 и 1400 км, а

две, ODYSSEY и ICO, – на средних 10350 км. Соответственно, существенно отличается и число используемых спутников: 48...66 – на низких орбитах и 10...12 – на средних, причем вторые значительно больше и тяжелее первых.

Таблица 4.1. Сводка характеристик четырех систем мобильной спутниковой связи

Система	IRIDIUM	GLOBALSTAR	ODYSSEY	ICO (INMARSAT-P)
Компания	Motorola	Loral/Qualcomm	TRW	ICO Global
Тип орбиты ИСЗ	Круговая (LEO)	Круговая (LEO)	Круговая (MEO)	Круговая (MEO)
Высота орбиты, км	780	1400	10350	10350
Наклонение орбиты, град	86	52	50	45
Число орбит/общее число ИСЗ	6/66	8/48	3/12	2/10
Масса ИСЗ, кг	700	450	2000	2000
Наличие связи между ИСЗ системы (частотный диапазон)	Есть (23,18...23,38 ГГц)	Нет	Нет	Нет
Преобразование сигналов на борту ИСЗ	С обработкой сигналов	Прямая ретрансляция	Прямая ретрансляция	Прямая ретрансляция
Число наземных узловых станций	12	150	7	12
Частотные диапазоны, МГц. фидерные линии связи				
- Земля – спутник	29100...29300	5091 5220	29100...29400	5150...5250
- спутник – Земля	19400...19600	6875,95...7052,9	19300...19600	6975...7075
пользовательские линии связи				
- Земля – спутник	1616...1626,5	1610...1626,5	1610,0...1626,5	1980...2010
- спутник – Земля	1616...1626,5	2483,5...2500	2483,5...2500,0	2170...2200
Тип множественного доступа	TDMA/FDMA	CDMA	CDMA	TDMA
Область обслуживания по широте	Без ограничений	70 гр. ю. ш. – 70 гр. с. ш.	Без ограничений	Без ограничений
Абонентский терминал: мощность передатчика, Вт	?	0,4	0,5	1
масса, г	700	350	?	750
примерная стоимость, долл.	2000	700	500...700	500...1000
Ориентировочный тарифный план:				
ежемесячная абонентская плата, долл.	50	?	20	?
оплата одной минуты эфирного времени, долл.	2	0,47	0,6...1,0	1...2
Срок ввода в эксплуатацию, г.	1998	1998 (частично)	2001 (с 6 ИСЗ)	1999/2000
Стоимость системы, млрд. долл.	3,5	2,5	3,2	2,6

Используемый тип множественного доступа – TDMA и CDMA, по две системы, – не связан с высотой орбиты. Все четыре системы в общем соизмеримы по стоимости, срокам создания и ряду других показателей, но в то же время существенно различаются по принципам построения и многим техническим характеристикам. На этих различиях мы сейчас и остановимся и попутно рассмотрим основные принципы построения систем такого типа.

Система IRIDIUM начала разрабатываться компанией Motorola (США) в 1989 г.; в 1993 г. был организован международный консорциум с участием ряда других компаний. Система названа по имени элемента *иридия*, атом которого имеет электронную оболочку из 77 электронов, так как первоначально в системе IRIDIUM предполагалось иметь 77 спутников, но позднее это число было изменено на 66. Как и три другие рассматриваемые системы, IRIDIUM предоставляет мобильным абонентам услуги передачи речи, факса, данных, персонального радиовызова и определения местоположения. Связь осуществляется с ручного абонентского терминала с ненаправленной антенной, который напоминает терминалы сотовых систем, но больше последних по размеру, массе, стоимости и потребляемой мощности. Для связи абонентского терминала со спутником служит *пользовательская линия связи (user link)*, в отличие от *фидерных (магистральных) линий связи (feeder links)*, используемых для связи ИСЗ с наземными станциями управления и *узловыми (шлюзовыми, региональными, базовыми) станциями (gateways)*; через последние обеспечивается выход в наземные стационарные сети – выделенные сети, сети общего пользования (PSTN), цифровые сети с интеграцией услуг (ISDN). Особенностью пользовательских линий связи системы IRIDIUM является то, что в обоих направлениях (Земля – спутник и спутник – Земля) в них используется одна и та же полоса частот с разносением информации прямого и обратного каналов во времени – дуплексная связь с временным разделением (Time Division Duplex, TDD). При этом в канале Земля – спутник используется метод множественного доступа с разделением по частоте (FDMA), а в канале спутник – Земля – с разделением во времени (TDMA).

Уникальной особенностью системы IRIDIUM является наличие *прямых линий* связи между спутниками системы: каждый спутник может одновременно связаться с четырьмя другими спутниками – двумя на той же орбите (соответственно по одному «вперед» и «сзади» относительно рассматриваемого) и по одному на двух смежных орбитах. Это позволяет организовать связь между двумя мобильными абонентами напрямую через систему спутников, без промежуточных выходов в наземные сети связи, но приводит к соответствующему усложнению аппаратуры на борту ИСЗ, которой приходится, в частности, производить обработку передаваемых сигналов. Еще одной уникальной особенностью системы является использование спутников на приполярных орбитах, что позволяет обеспечить связью всю без исключения поверхность Земли. Три другие системы используют орбиты с наклонениями

45...50 град. В результате низкоорбитальная система GLOBALSTAR в полярных районах связь не обеспечивает, а среднеорбитальные ODYSSEY и ICO обеспечивают, но при меньших углах места.

Антенная система пользовательской линии связи на борту ИСЗ формирует систему пространственных лучей, направленных на Землю – всего 48 лучей, покрывающих зону, обслуживаемую одним спутником, диаметром около 4500 км. В смежных лучах используются разные рабочие частоты, а для разнесенных по угловым направлениям лучей значения частот повторяются, т.е. для рационального использования частотного ресурса применяется тот же принцип повторного использования частот, что и в сотовой связи. При движении спутника неподвижный абонент на поверхности Земли находится в пределах «следа» (*footprint*) одного луча примерно в течение двух минут. Поэтому в необходимых случаях производится передача обслуживания абонента из одного луча в другой или даже от одного ИСЗ системы к другому без прерывания сеанса связи, аналогично тому, как это делается в системах сотовой связи.

Вывод на орбиту спутников системы IRIDIUM был начат в мае – июне 1997 г. и должен быть завершен в 1998 г., так чтобы к концу 1998 г. начать полномасштабную эксплуатацию системы. Планируемая емкость системы в первые годы ее эксплуатации – около 1 миллиона абонентов.

Система GLOBALSTAR разрабатывается с 1991 г. международным консорциумом, в качестве ведущих в котором обычно выделяют компании Loral и Qualcomm (США). 48 спутников системы располагаются на шести круговых орбитах высотой 1400 км с наклонением 52 град.; при этом для любой точки территории США обеспечивается возможность одновременного наблюдения двух спутников. Для сравнения: система IRIDIUM рассчитана на односпутниковое покрытие обслуживаемых территорий. Спутники системы GLOBALSTAR легче и проще по устройству, чем в системе IRIDIUM, и на борту не предусмотрено обработки сигналов; ИСЗ выполняют роль ретрансляторов с преобразованием частоты. Число лучей в многолучевой связке, формируемой антенной системой пользовательской линии связи на борту спутника, равно 16; диаметр соответствующей зоны обслуживания на поверхности земли около 6000 км. Поскольку прямая связь между спутниками системы отсутствует, наземные узловые станции участвуют и в организации связи между подвижными абонентами, за исключением тех ситуаций, когда оба абонента, устанавливающие связь друг с другом, оказываются в зоне действия одного и того же ИСЗ системы. Соответственно на узловые станции здесь ложится существенно большая нагрузка, чем в системе IRIDIUM, и число узловых станций в системе GLOBALSTAR значительно больше. Использование метода множественного доступа с кодовым разделением сигналов (CDMA) в исполнении компании Qualcomm обуславливает заметную корреляцию в построении каналов связи и методах обработки сигналов со стандартом IS-95 сотовой связи

(функции Уолша, «короткая» и «длинная» псевдослучайные последовательности, пилот-сигнал, каналы синхронизации, вызова и трафика, использование одной и той же полосы частот во всех лучах многолучевой связки и т.п.). Хотя разработка системы GLOBALSTAR была начата примерно одновременно с системой IRIDIUM и первая проще (или, во всяком случае, дешевле) второй, ввод ее в эксплуатацию, по-видимому, будет осуществлен на год или два позднее.

Система ODYSSEY, разрабатываемая компанией TRW (США), использует 12 спутников на средневысотных круговых орбитах с наклоном 50 град. Как и в системе GLOBALSTAR, спутники здесь являются только ретрансляторами с преобразованием частоты, и связь организуется через наземные узловые станции. Число последних, однако, значительно меньше, чем в системе GLOBALSTAR, так как большая высота орбит ИСЗ позволяет обслуживать с одного спутника значительно большие территории. Многолучевая связка антенной системы пользовательской линии связи на борту ИСЗ состоит из 19 лучей. Отличительная особенность системы ODYSSEY – квазистатическое расположение следов лучей на поверхности Земли. Во-первых, лучи устанавливаются преимущественно в направлении суши и наиболее активно используемых участков акватории океана. Во-вторых, по мере движения ИСЗ по орбите ориентация лучей корректируется таким образом, чтобы сотовая структура, образуемая следами лучей на поверхности Земли, оставалась неподвижной, и только при уходе спутника за радиогоризонт (раз в 1...2 ч) производится переключение зон обслуживания на другой спутник. В результате передача обслуживания, в том виде как это приходится осуществлять в низкоорбитальных системах IRIDIUM и GLOBALSTAR, производится достаточно редко. Ввод в эксплуатацию системы ODYSSEY планируется еще позднее, чем ввод системы GLOBALSTAR. Отметим, что корректный перевод названия ODYSSEY на русский язык – ОДИССЕЯ, хотя его произношение по-английски близко к «Одиссей», с главным ударением на первом слоге.

Система ICO, первоначально носившая название Inmarsat-P, начала разрабатываться позднее остальных – в 1994 г. по инициативе консорциума INMARSAT. В 1995 г. для реализации проекта была создана дочерняя компания ICO Global Communications со штаб-квартирой в Лондоне. Название ICO является сокращением от Intermediate Circular Orbit – промежуточная круговая орбита. В первоначальных вариантах проекта рассматривались и другие варианты орбит. В системе ICO используется 10 спутников на двух средневысотных круговых орбитах с наклоном 45 град. Спутники, как и в системах GLOBALSTAR и ODYSSEY, выполняют функции ретрансляции без обработки сигналов, и для организации связи используются наземные узловые станции, число которых, как и в системе ODYSSEY, сравнительно невелико. Несмотря на относительно поздний старт, разработка системы ведется очень интенсивно, в чем помогает, по-видимому, опыт работы с системой

INMARSAT. Первые запуски спутников системы ICO планируются на 1998 г., ввод системы в эксплуатацию – частично в 1999 г. и полностью в 2000 г.

Таким образом, системы мобильной спутниковой связи становятся реальностью. Имеются все основания полагать, что на рубеже тысячелетий мобильная спутниковая связь станет если и не столь же распространенной, как сотовая связь сегодня, то, во всяком случае, не менее известной и практически всюду доступной. В настоящее время представляются актуальными следующие области применения мобильной спутниковой связи:

- расширение сотовых сетей (*cellular extension*): использование спутниковой связи вместо сотовой в тех районах, где последней пока нет или ее развертывание нецелесообразно, например, из-за низкой плотности населения;
- дополнение сотовых сетей (*cellular complement*): использование спутниковой связи в дополнение к существующей сотовой, например, для обеспечения роуминга при несовместимости стандартов или в каких-либо чрезвычайных ситуациях;
- стационарная беспроводная связь (*fixed wireless*), например, в малонаселенных районах при отсутствии проводной связи.

Тем самым спутниковая связь не выступает в качестве конкурента сотовой, а достаточно органично сочетается с последней. Практически во всех системах мобильной спутниковой связи предусматривается довольно высокая степень интеграции с сотовой связью; в частности, помимо абонентских терминалов, предназначенных для спутниковых систем, предполагается создание двухрежимных терминалов, предназначенных для работы как в спутниковой системе, так и в каком-либо из сотовых стандартов. К возможностям сочетания различных видов мобильной связи, в том числе спутниковой, мы еще вернемся в разделе 6, где рассмотрим и некоторые дополнительные аспекты этой проблемы.

4.5. Беспроводной телефон и локальные беспроводные сети

Беспроводной телефон во многих случаях ассоциируется со стандартом DECT (*Digital European Cordless Telecommunications* – в буквальном переводе *цифровая европейская беспроводная электросвязь*), и не без оснований, хотя полного совпадения здесь нет: и беспроводной телефон может быть построен на основе других стандартов, и стандарт DECT может быть использован для построения других систем. В настоящем разделе мы отметим основные системы беспроводного телефона, рассмотрим характеристики стандарта DECT, а также некоторые другие вопросы, с тем чтобы в пределах выбранной степени детализации получить по возможности полную картину всего комплекса вопросов, связан-

ных с беспроводным телефоном и его применениями [115, 120, 162, 140, 114, 108, 128, 170].

Беспроводной телефон – это мобильная телефонная связь, но с ограниченной подвижностью абонентов, причем ограничения относятся как к дальности (десятки – сотни метров), так и к скорости перемещения (скорость пешехода). Беспроводной телефон в первую очередь рассчитан на применение внутри помещений, при малых расстояниях и, следовательно, при малых задержках сигналов и малых разностях хода при многолучевом распространении, даже при весьма сложных законах прохождения сигналов в зданиях. Отсюда непосредственно следуют некоторые характерные особенности:

- небольшая мощность излучения, обычно не более 10 мВт в среднем, и соответственно экономное расходование энергии источника питания;
- сравнительно простая обработка сигналов (не столь экзотическое, как в сотовой связи, кодирование речи; отсутствие канального кодирования и эквалайзинга) при высоком качестве передачи речи, не уступающем качеству проводного телефона;
- динамическое распределение каналов, позволяющее весьма рационально использовать имеющийся частотный ресурс;
- дуплексная связь с временным разделением каналов (Time Division Duplex – TDD), при этом связь в прямом и обратном направлениях реализуется в одном и том же частотном канале.

В каком-то смысле беспроводной телефон напоминает сотовую связь с весьма маленькими сотами, но при более внимательном рассмотрении выясняется, что различия между ними достаточно велики. Помимо уже упоминавшихся особенностей следует отметить, что в системах беспроводного телефона обычно не предусматривается более или менее сплошного покрытия территории, заметно различаются наборы услуг и структура эфирного интерфейса. Конкретные примеры этих различий мы увидим ниже, при рассмотрении стандарта DECT.

Исторически системы беспроводного телефона появились в конце 70-х – начале 80-х годов, первоначально в виде весьма разнородных разработок отдельных компаний. Элементы стандартизации появились в середине 80-х годов, их воплощением можно считать систему СТ1 (*Cordless Telephone* – беспроводной телефон, поколение 1) – это аналоговая система с жесткой привязкой подвижной станции к одному или нескольким (до восьми) частотным каналам, использующая при передаче речи частотную модуляцию.

Частотные диапазоны: в Европе 900 МГц при 40 частотных каналах и полосе канала 50 кГц; в Америке 1,7 МГц для прямого канала (от базовых станций к подвижным) при 8 каналах по 20 кГц и 47,5 МГц для обратного канала при 8 каналах по 12,5 кГц.

К концу 80-х годов в Англии появилась цифровая система второго поколения – CT2, которая сначала существовала в виде двух несовместимых модификаций, но в 1988-1989 гг. была объединена в одну посредством разработки *общего эфирного интерфейса (Common Air Interface – CAI)*; позднее, в 1992 г., ETSI принял стандарт CAI в качестве европейского технического стандарта. В системе CT2 используется частотный диапазон 864,1...868,1 МГц с 40 каналами по 100 кГц при методе множественного доступа FDMA, но с временным разделением дуплексных каналов (TDD). Метод модуляции – частотная манипуляция. В этой системе уже реализовано динамическое распределение каналов, но еще нет передачи обслуживания из ячейки в ячейку. Известна канадская модификация системы CT2+, работающая в диапазоне 944...952 МГц; предлагались и некоторые другие модификации, но они не получили широкого распространения. Компанией Ericsson была разработана система CT3; фактически она близка к системе DECT, речь о которой впереди, но работает в диапазоне 862...866 МГц (иногда ее называют также DECT-900).

Система DECT – наиболее совершенная цифровая система беспроводного телефона, использующая методы TDMA и TDD и работающая в диапазоне 1880...1900 МГц. Работа над стандартом была начата в 1988 г. и проходила под эгидой ETSI; окончательная редакция стандарта была принята в 1992 г. Основные характеристики системы DECT представлены в табл. 4.2, схема организации эфирного интерфейса дана на рис. 4.1. В дополнение к приведенной в таблице и на рисунке информации отметим следующее.

В отведенной под систему DECT полосе частот 1880...1900 МГц размещается 10 частотных каналов. Каждый из них содержит 12 физических каналов с дуплексным разделением во времени, так что каждый кадр эфирного интерфейса состоит из 24 слотов, 12 из которых используются для передачи информации в прямом направлении (от базовой станции к подвижным) и 12 – в обратном. Пара слотов одного и того же физического канала имеет номера, отличающиеся на 12 (например, 0 и 12, 1 и 13 и т.д.). Длительность кадра 10 мс. 16 кадров образуют мультикадр; кадры в пределах мультикадра различаются составом передаваемой информации управления. Каждый слот содержит коды синхронизации (поле S), управляющую информацию (поле A), информацию пользователя (речь или компьютерные данные – поле B) и контрольную информацию (поле X).

Сумма всех перечисленных полей короче слота на величину защитного интервала. Метод кодирования речи – адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (АДИКМ) при скорости передачи информации 32 кбит/с, что обеспечивает высокое качество передачи речи. При передаче речи не применяются коды, исправляющие ошибки, но используются коды, позволяющие их обнаруживать, – циклические коды избыточности (CRC); соответствующие контрольные суммы включаются в поля A (для информации управления) и X (для информации поля B).

Таблица 4.2. Основные характеристики системы DECT

Характеристика	Значение
Рабочая полоса частот, МГц	1880...1900
Полоса частотного канала, МГц	1,728
Число частотных каналов	10
Метод множественного доступа	TDMA/TDD
Длительность кадра эфирного интерфейса, мс	10
Число слотов в кадре	12
(для каждого из направлений прямо/обратно)	416,7
Длительность слота, мкс	АДИКМ
Метод кодирования речи	32
Скорость передачи информации речи, кбит/с	416
Полная скорость передачи информации в одном физическом канале (в одну сторону), кбит/с	1152
Полная скорость передачи информации в одном частотном канале (в обе стороны), кбит/с	GMSK
Метод модуляции	250
Мощность передатчика абонентского терминала, мВт:	10
пиковая	
средняя	

Информация о частоте ошибок наряду с информацией об интенсивности сигналов используется для организации передачи обслуживания. Последняя может быть как между разными физическими или частотными каналами в пределах одной ячейки (внутриячейная передача обслуживания – *intracell handover*), так и между ячейками (межячейная передача обслуживания – *intercell handover*), причем инициатива передачи обслуживания, включая выбор наиболее подходящего частотного и физического канала, принадлежит подвижной станции. Такая процедура организации взаимодействия подвижных станций с базовыми естественным образом сочетается с динамическим распределением каналов, когда каждая подвижная станция (абонентский терминал) выбирает для работы канал с достаточно высоким отношением сигнал/шум и достаточно низкой частотой ошибок. При этом, как предусмотрено стандартом, каждой базовой станции и каждому абонентскому терминалу доступны все частотные и физические каналы в пределах рабочего частотного диапазона. Заметим попутно, что для базовых и подвижных станций в системах беспроводного телефона обычно употребляются наименования *fixed station* (буквально – неподвижная станция) и *portable station*

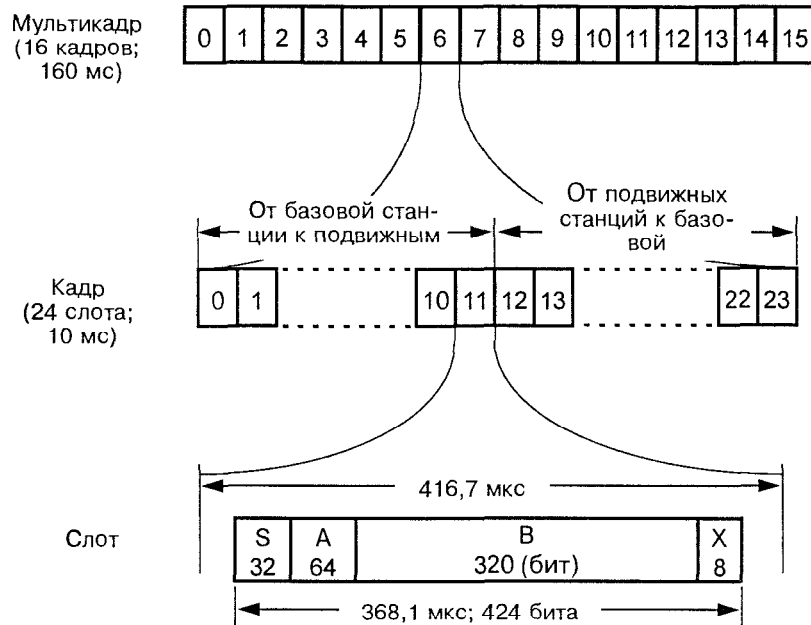


Рис. 4.1. Структура кадра и слота эфирного интерфейса стандарта DECT:

S – поле синхронизации, A – поле управления; B – поле информации пользователя (речь или компьютерные данные); X – контрольное поле

(портативная станция) или *fixed part* и *portable part* (соответственно *неподвижная* и *портативная части*). Стандартом DECT предусмотрены процедуры аутентификации и шифрования передаваемой информации. Стандарт отличается значительной гибкостью; в частности, предусматривается возможность передачи информации только в одном направлении, когда оба слота одного физического канала в кадре используются только для передачи или только для приема информации, и возможность повышения скорости передачи информации, когда один физический канал занимает несколько слотов в кадре.

Области применения стандарта DECT:

- беспроводной телефон в бытовом секторе;
- беспроводной телефон в бизнес-секторе;
- общественный беспроводной телефон;
- локальные беспроводные сети;

– локальные компьютерные сети.

Кратко прокомментируем перечисленные позиции.

Бытовое применение беспроводного телефона (*domestic cordless*, или *residential cordless*) считается простейшим и рассматривается как беспроводное абонентское окончание или радиоудлинитель линии стационарной телефонной сети. В этом случае не только абонентские терминалы, но и базовые станции обычно являются собственностью абонентов, например, владельцев частных домов. Базовая станция подключается проводной линией связи к стационарной телефонной сети, и в зоне ее действия (в пределах дома и в ближайшей его окрестности) можно использовать ручные мобильные терминалы, позволяющие абоненту как звонить самому, так и принимать входящие вызовы.

В бизнес-секторе (*business wireless*, или *business cordless*) схема организации системы беспроводной телефонной связи на одну ступень сложнее: здание офиса, как правило, охватывается не одной, а несколькими ячейками со своей базовой станцией в каждой ячейке, которые, в свою очередь, замыкаются на центральный блок управления; последний связывается с офисной АТС (PBX – Private Branch Exchange, буквально – частный коммутатор) или входит в ее состав, а офисная АТС подключается к стационарной телефонной сети.

Своеобразную систему связи представляет собой общественный беспроводной телефон (*telepoints*, в буквальном переводе – *телефонные пункты*): базовые станции устанавливаются в оживленных местах города – на перекрестках улиц, в торговых центрах и т.п., и в пределах зон их действия владельцы зарегистрированных абонентских терминалов могут пользоваться телефонной связью. Наиболее совершенные системы такого типа предусматривают возможность как исходящих, так и входящих вызовов, а также передачу обслуживания между ячейками. В соответствии со стандартом обеспечивается совместимость устройств разных производителей аппаратуры; абонент может также использовать один и тот же терминал дома, в офисе и на улице.

Локальные беспроводные сети (ЛБС) могут строиться, как упоминавшиеся выше бытовые или офисные сети беспроводного телефона, но часто с фиксированными (неподвижными) абонентскими терминалами, хотя возможны и другие схемы их построения, на чем мы чуть подробнее остановимся ниже.

Применение стандарта DECT для построения локальных компьютерных сетей (LAN – Local Area Networks) является, по видимому, наиболее сложным из всех его применений; при этом могут быть реализованы различные конфигурации сетей что в значительной мере опирается на широкие возможности и гибкость эфирного интерфейса стандарта. К сожалению, обсуждение более тонких деталей локальных компьютерных сетей выходит за рамки возможностей данной книги.

Вернемся к локальным беспроводным сетям и рассмотрим проблему их развития несколько подробнее. Понятие ЛБС (WLL –

Wireless Local Loops) появилось не так давно: по-видимому, возникновение первых сетей относится к 1995 г. Схемы построения ЛБС весьма разнообразны. Характерным для всех них является замена некоторого участка проводной (коаксиальной, оптоволоконной) линии связи беспроводной (радиолинией). Беспроводная связь может быть реализована на всем участке от коммутатора (АТС) до абонента, или только от АТС до промежуточного концентратора, или только на участке абонентских окончаний и т.д. ЛБС могут строиться не только на базе беспроводного телефона или конкретно стандарта DECT – среди имеющихся разработок и предложений такие варианты пока не составляют большинства. Более распространены разработки на основе технологии сотовой связи, с использованием практически всех основных сотовых стандартов; известны также нестандартизованные разработки, в частности с использованием диапазона 3,5...4 ГГц.

В качестве преимуществ ЛБС обычно отмечаются:

- простота их проектирования и быстрота развертывания в сравнении с проводными сетями;
- более низкая стоимость создания и эксплуатации при низкой плотности абонентов или при значительной неопределенности в отношении численности абонентской базы и темпов ее роста;
- гибкость сети, в частности в отношении последовательности наращивания ее емкости;
- удобство использования при необходимости быстрого или временного развертывания сети связи, например после стихийных бедствий.

Относительная новизна направления ЛБС находит отражение и в недостаточно устоявшейся терминологии. Так, в английском языке наряду с наиболее распространенным названием WLL используются и другие: Radio Local Loop (RLL) – локальная радиосеть, Wireless Telephony System (WTS) – беспроводная система телефонной связи, Wireless Access System (WAS) – система связи с беспроводным доступом и т.п. Судя по публикациям и проспектам фирм-производителей аппаратуры связи, развитию ЛБС уделяется большое внимание. В соответствии с имеющимися прогнозами, число абонентов ЛБС в мире к 2000 г. может достигнуть 20...30 миллионов человек.

Возвращаясь к беспроводному телефону и подводя итоги по основному содержанию настоящего раздела, мы можем сделать вывод, что беспроводной телефон – удобный и достаточно широко распространенный вид связи, удачно дополняющий сотовую связь при ограниченной (локальной) подвижности абонентов. Тем самым открываются интересные перспективы по сочетанию беспроводного телефона и сотовой связи, обещающие дополнительную гибкость и удобства в предоставлении услуг мобильной связи. Один из примеров – систему PHS – мы рассмотрим в следующем разделе, а некоторые другие возможности и перспективы обсудим в разд. 6.

4.6. Система подвижной связи PHS

Система PHS (Personal Handyphone System, в буквальном переводе – система персонального ручного телефона) разработана в Японии, и некоторые японские авторы полагают, что ее можно рассматривать как своеобразную «японскую версию» системы персональной связи [150, 165, 169, 60].

Корни системы PHS уходят к беспроводному телефону, точнее – к системе общественного беспроводного телефона (telepoints). Непосредственная работа над системой PHS в Японии началась в 1991 г., и в декабре 1993 г. был опубликован ее стандарт STD-28, разработанный Центром исследований и развития радиосистем (Research & Development Center for Radio Systems – RCR). С октября 1993 г. до октября 1994 г. были проведены обстоятельные испытания системы в регионах Саппоро и Токио, по результатам которых были приняты окончательные решения о порядке ее развертывания. Система создавалась при прямой поддержке государства. В частности, было решено вводить систему на всей территории Японии, разделив территорию на десять блоков, с функционированием трех сервис-провайдеров в каждом блоке. Было определено, что связь в системе PHS должна быть втрое дешевле сотовой. Отдельное решение разрешало операторам системы устанавливать антенны в любых удобных для них местах. Коммерческая эксплуатация системы началась с 1 июля 1995 г.

Основу сети PHS составляют микросоты радиусом 100...300 м, каждая из которых обслуживается своей базовой станцией (станцией ячейки – cell station). Базовые станции, в свою очередь, подключаются (непосредственно или через промежуточные коммутаторы) к существующей стационарной (проводной) телефонной сети, которая в Японии хорошо развита. Тем самым обеспечивается дешевое построение сети мобильной связи национального масштаба. Сеть PHS, следовательно, можно рассматривать как беспроводную сеть, в чем-то похожую на ЛБС, но не в локальном, а в национальном масштабе. Как и в беспроводном телефоне, в системе PHS предусматриваются применения в бытовом секторе, в бизнес-секторе и в секторе общественной связи (связи «на улице», куда включаются также подземные торговые центры, и т.п.). Для обеспечения всех этих направлений разработан целый ряд соответствующих типов оборудования; в соответствии с конкретными условиями используется несколько вариантов подключения сетей PHS к сетям PSTN/ISDN.

В системе PHS технически возможна связь непосредственно между двумя абонентскими терминалами, если они находятся достаточно близко один от другого (режим walkie-talkie); в этом случае оба абонента за вызов ничего не платят, поскольку оборудование компании-оператора в сеансе связи не используется. Стандарт

PHS предоставляет возможность передачи данных со скоростью 9,6 кбит/с (через модем) или 32 кбит/с (ISDN); в перспективе обещана передача данных со скоростью 64 кбит/с и мультимедиа. Система PHS имеет существенное ограничение: скорость перемещения абонентов должна быть не более 30 км/ч. Причина этого, по-видимому, связана с ограниченностью допустимого потока передач обслуживания в микросотах.

Основные характеристики системы PHS представлены в табл. 4.3. Сопоставление их с характеристиками беспроводного телефона стандарта DECT (табл. 4.2) показывает, что по многим параметрам обе системы одинаковы. Это относится к используемому методу множественного доступа, методу кодирования и скорости передачи информации речи и т.п. В то же время некоторые характеристики различаются, в частности полоса частотного канала (и соответственно скорость передачи информации в канале) и метод модуляции.

Таблица 4.3. Сводка характеристик системы PHS

	Характеристика	Значение
	Рабочая полоса частот, МГц	1895...1918
	Полоса частотного канала, кГц	300
~ σ	Число частотных каналов	77
хл	Метод множественного доступа	TDMA/TDD
рл	Распределение частотных каналов	Динамическое
у	Метод кодирования речи	АДИКМ
	Скорость передачи информации речи, кбит/с	32
	Скорость передачи информации в канале, кбит/с	384
	Метод модуляции	$\pi/4$ QPSK
	Средняя мощность передатчика абонентского терминала, мВт	10

Система PHS получила признание сразу же после выхода на рынок. За два года, с июля 1995 г. до июля 1997 г., число ее абонентов выросло с нуля до 6,9 миллионов. Появление системы PHS сказалось и на развитии рынка собственно сотовой связи, абонентская база которой за те же два года выросла с 5 до 23,5 миллионов человек. В текущих сводках для Японии часто указывают суммарное число абонентов сотовой связи и PHS; на начало июля 1997 г. оно составляло более 30 миллионов человек, при численности населения Японии 126 миллионов. Предпринимаются шаги по продвижению системы PHS в Гонконг, Индонезию и другие страны Юго-Восточной Азии и Океании.

4.7. В чем секрет успеха сотовой связи?

Рассмотрев все основные виды подвижной связи, обратимся к ключительным вопросам этого раздела: что определяет столь динамичное развитие сотовой связи? Чем можно объяснить ее успех при наличии целого ряда других видов подвижной связи?

Похоже, что готового ответа на эти вопросы нет, по крайней мере в приемлемо лаконичной и одновременно исчерпывающе полной форме. Возможно, что такой ответ и вообще не так просто сформулировать. Между тем, поскольку успешное развитие сотовой связи – факт, не вызывающий сомнений, нам представляется необходимым попытаться на эти вопросы ответить хотя бы в той мере, в какой это оказывается возможным.

Если говорить коротко, то успех сотовой связи обусловлен, на наш взгляд, набором предоставляемых услуг в сочетании с ценой последних. Именно эти факторы играют основную роль при сопоставлении сотовой связи с транковой, пейджингом и другими. Поясним этот тезис несколько подробнее.

Сотовая связь – мобильная связь, не ограничивающая подвижности абонента. Это удобно пользователю, это отвечает его потребностям при современном напряженном ритме жизни, при высокой цене информации и актуальности оперативного ее получения. Вдобавок к этому сотовая связь предоставляет все виды услуг, характерные для современной проводной телефонной связи, и, что не менее важно, в удобном и привычном для пользователя виде, с прямым выходом на стационарную телефонную сеть. Другие виды подвижной связи, как мы видели, таким набором качеств не обладают. Действительно, транковая связь по набору услуг беднее сотовой, хотя и дешевле. Пейджинг по своим возможностям уступает сотовой связи еще больше – как телеграф в сравнении с телефоном. Мобильная спутниковая связь по набору и качеству услуг весьма близка к сотовой, но, во-первых, пока ее нет, а во-вторых, она будет дороже. Беспроводной телефон хорош всем, кроме ограничения мобильности абонентов, в этом он уступает сотовому, а такие возможности, как в Японии для развертывания системы типа PHS, реализуемы далеко не везде.

Разумеется, сегодняшний прогресс сотовой связи был бы невозможен и без ряда других необходимых условий, в частности без успехов микроэлектроники, без цифровых методов обработки сигналов и современных методов кодирования, без мощных усилителей многих ведущих компаний-производителей аппаратуры и высокого профессионализма их сотрудников, наконец, без огромных инвестиций в телекоммуникационные технологии.

И еще одна характерная черта сотовой связи: она непрерывно развивается и совершенствуется. Сегодня она совсем не та, что была пять или десять лет назад, а еще через пять или десять лет совершенно не будет похожа на сегодняшнюю. Уже сейчас на повестке дня стоит проблема интеграции различных видов мобильной связи, и фактически мобильная связь начинает конкурировать со стационарной (проводной). Мы не будем, однако, рассматривать здесь эти вопросы подробнее, отложив их до разд 6.

Таким образом, даже из тех немногих положений, которые мы изложили, видно, что сотовая связь уникальна по своим характеристикам и возможностям и ее успех совершенно не случаен. Более того, можно с уверенностью полагать, что она будет успешно развиваться и дальше.

Глава 5 СОТОВАЯ СВЯЗЬ СЕГОДНЯ

5.1. Основные стандарты сотовой связи

В предыдущих разделах, знакомясь с историей и принципами построения систем сотовой связи, рассматривая их возможности и виды предоставляемых услуг, мы в той или иной форме коснулись практически всех основных стандартов. При этом два стандарта – D-AMPS и GSM – были рассмотрены достаточно подробно.

Другим стандартам было уделено значительно меньше внимания, а некоторые из них мы лишь упомянули в связи с историей развития сотовой связи. В настоящем разделе мы дадим систематизированную сводку по всем основным стандартам и дополнительно отметим ряд деталей, о которых не было речи в предыдущем изложении.

Сводки характеристик основных стандартов сотовой связи представлены в виде двух таблиц: табл. 5.1 – по аналоговым стандартам, табл. 5.2 – по цифровым стандартам. Сопроводим их некоторыми комментариями, по возможности не повторяя сказанного ранее. Начнем с аналоговых стандартов.

Стандарт AMPS помимо США и Канады используется практически во всех странах Северной, Центральной и Южной Америки, а также во многих странах Азии и Океании, Ближнего и Среднего Востока, Африки, в Австралии, т.е. практически во всем мире, кроме Западной Европы и Японии; по состоянию на начало 1997 г. он использовался более чем в 100 странах мира.

В США частотный диапазон этого стандарта, как мы уже упоминали, делится на два блока, лицензии на которые предоставляются (продаются) разным операторам: блок А – 869...880/824...835 МГц и 890...891,5/ 845...846,5 МГц, блок В – 880...890/835...845 МГц и 891,5...894/ 846,5...849 МГц. Стандарт AMPS имеет модификацию NAMPS (Narrow band AMPS, т.е. узкополосный AMPS), разработанную компанией Motorola (США) и закрепленную стандартами IS-88, IS-89, IS-90.

Основное отличие модификации NAMPS состоит в том, что полоса частотного канала составляет 10 кГц, т.е. число частотных каналов втрое больше, чем в AMPS, в пределах того же частотного диапазона; кроме того, в ней имеется и ряд других особенностей. Аппараты стандарта NAMPS всегда совместимы со стандартом AMPS.

Таблица 5.1. Сводка характеристик аналоговых стандартов сотовой связи

Характеристика	AMPS	TACS	NMT 450	NMT 900	NTT
Страна (регион) основного применения	США, Канада	Англия	Скандинавия	Скандинавия	Япония
Начало коммерческого применения	1983	1985	1981	1986	1979
Диапазон частот на передачу, МГц:					
– базовые станции (прямой канал)	869...894	935...950	463...467,5	935...960	925...940
– подвижные станции (обратный канал)	824...849	890...905	453...457,5	890...915	870...885
Дуплексный разнос частот, МГц	45	45	10	45	55
Полоса частотного канала, кГц	30	25	25/20	25/12,5	25
Метод множественного доступа	FDMA	FDMA	FDMA	FDMA	FDMA
Метод модуляции для сигналов речи	ЧМ	ЧМ	ФМ	ФМ	ЧМ
Метод модуляции для сигналов управления	ЧМН	ЧМН	БЧМН	БЧМН	ЧМН

Примечание: ЧМ - частотная модуляция, ЧМН - частотная манипуляция; ФМ - фазовая модуляция; БЧМН - быстрая частотная манипуляция (она же - манипуляция с минимальным сдвигом: MSK).

Таблица 5.2. Сводка характеристик цифровых стандартов сотовой связи

Характеристика	D-AMPS (800)	D-AMPS (1900)	PDC	CDMA (800)	CDMA (1900)	GSM 900	GSM 1800	GSM 1900
Страна (регион) основного применения	США, Канада 1992	США, Канада 1996	Япония 1993	Ю.Корея, США 1995	США 1995	Зап. Европа 1991	Зап. Европа 1993	США, Канада 1996
Начало коммерческого применения	869...894	1930...1990	810...826 1429...1441 1453...1465	869...894	1930...1990	935...950	1710...1785	1930...1990
Диапазон частот на передачу, МГц:	824...849	1850...1910	940...956 1477...1489 1501...1513	824...849	1850...1910	890...915	1805...1880	1850...1910
-- базовые станции (прямой канал)	45	80	130, 48	45	80	45	95	80
-- подвижные станции (обратный канал)	30	30	25	1250	1250	200	200	200
Дуплексный разнос частот, МГц	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA	CDMA	TDMA	TDMA	TDMA
Полоса частотного канала, кГц	3	3	3	до 62	до 62	8	8	8
Метод множественного доступа	$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ DQPSK	QPSK	QPSK	GMSK	GMSK	GMSK
Число физических каналов в одном частотном канале	VSELP	DQPSK VSELP	VSELP	CELP	CELP	RPE-LTP	RPE-LTP	RPE-LTP
Метод модуляции	8	8	6,7	1...8	1, 8	13	13	13
Метод кодирования речи								
Скорость кодирования сигнала речи, Кбит/с								

Примечание: $\pi/4$ DQPSK - $\pi/4$ Differential Quadrature Phase Shift Keying; QPSK - Quadrature Phase Shift Keying; GMSK - Gaussian Minimum Shift Keying; VSELP - Vector Sum Excited Linear Prediction; RPE-LTP - Regular Pulse Excited Long Term Prediction; CELP - Code Excited Linear Prediction; число физических каналов и скорость кодирования соответствуют полноскоростному кодированию.

Стандарт TACS близок по техническим характеристикам к AMPS, за исключением диапазона частот. Помимо Англии TACS используется в других европейских странах (Италия, Испания, Австрия), а также в ряде стран Азии и Океании, Среднего Востока и Африки. Стандарт TACS имеет модификации ETACS (Enhanced TACS, т.е. усовершенствованный TACS), JTACS (Japanese TACS – японский TACS), NTACS (Narrow band TACS), различающиеся по используемому частотному диапазону, полосе частотного канала и числу частотных каналов и по некоторым другим характеристикам.

Стандарты NMT 450 и NMT 900 по техническим характеристикам близки между собой, за исключением диапазона, но отличаются от AMPS и TACS, в частности, методами модуляции и протоколами передачи информации управления; с самого начала в них предусматривалась возможность роуминга. Помимо Скандинавских стран эти стандарты используются во многих странах Западной и Восточной Европы и в ряде стран других регионов мира. Существует модификация стандарта NMT 450, включающая систему SIS (Subscriber Identity Security, буквально «безопасность идентификатора абонента») с усовершенствованной процедурой аутентификации NMT 450i (improved, т.е. «улучшенный» стандарт). Система SIS реализована и в стандарте NMT 900. Известны также «австрийская» и «французская» модификации стандарта NMT 450 – соответственно NMT 450A и NMT 450F.

Система NTT – первая из развернутых в Японии аналоговых систем; она известна также под названием MCS-L1 (MCS-L2). С 1989 г. в Японии используется стандарт JTACS, позднее – NTACS, близкие к стандарту TACS.

Кроме указанных в табл. 5.1 существует еще ряд аналоговых стандартов, не имеющих широкого распространения, а именно:

- C-450 (C-Netz, т.е. сеть C): диапазон 450 МГц, используется в Германии (с 1985 г.), а также в Португалии и Южной Африке; исторически система C – третья система общественной радиотелефонной связи в Германии, причем две первые (A-Netz – до 1977 г., B-Netz – 1972...1992 гг.), работавшие в диапазоне 160 МГц, не были сотовыми;
- RTMS: диапазон 450 МГц, используется в Италии (с 1985 г.);
- R-2000 (Radiocom-2000): диапазоны 200 и 400 МГц, используется во Франции (с 1985 г.);
- Comvic ACS (Advanced Cellular System – усовершенствованная сотовая система): диапазоны 400 и 800 МГц, использовалась в Швеции (с 1983 г.) и в Гонконге.

Перейдем к цифровым стандартам.

Стандарт D-AMPS диапазона 800 МГц используется практически в тех же странах, что и аналоговый AMPS, хотя в большинстве случаев продвижение цифрового стандарта происходит трудно и медленно. Все абонентские терминалы, поддерживающие стандарт D-AMPS, поддерживают и аналоговый AMPS. Для D-AMPS, равно как и для стандарта CDMA диапазона 800 МГц, в

США сохраняется то же разделение частотного диапазона на блоки А и В, как и в AMPS. Известна модификация D-AMPS – стандарт E-TDMA (Extended TDMA, т.е. расширенный TDMA), разработанный компанией Hughes (США) с целью повышения емкости системы; в этой модификации используются полускоростное кодирование и цифровая интерполяция речи. Абонентские терминалы, поддерживающие E-TDMA, поддерживают также AMPS и D-AMPS.

В стандарте D-AMPS диапазона 1900 МГц (и в стандартах CDMA и GSM того же диапазона) общая полоса частот делится в США на шесть частотных блоков, лицензируемых по отдельности (табл.5.3). В диапазоне 1900 МГц стандарт D-AMPS используется только в версии IS-136; пока основные регионы его применения – США и Канада.

Таблица 5.3. Частотные блоки диапазона 1900 МГц (США, стандарты D-AMPS-1900, CDMA-1900, GSM-1900)

Наименование блока	Прямые каналы, МГц	Обратные каналы, МГц
A	1930...1945	1850...1865
B	1950...1965	1870...1885
C	1975...1990	1895...1910
D	1945...1950	1865...1870
E	1965...1970	1885...1890
F	1970...1975	1890...1895

Стандарт PDC, первоначально носивший наименование JDC, используется лишь в Японии. Из его особенностей, пожалуй, можно подчеркнуть только работу в нескольких частотных диапазонах.

Два варианта стандарта CDMA (диапазонов 800 и 1900 МГц) практически одинаковы по техническим характеристикам и отличаются только рабочими полосами частот. Стандарт CDMA диапазона 800 МГц наибольшее распространение получил сначала в Южной Корее, затем – в США, диапазона 1900 МГц – в основном в США.

Три варианта стандарта GSM (900, 1800 и 1900 МГц) технически, за исключением диапазона, также почти не отличаются друг от друга. Стандарт GSM 900 получил широкое распространение во всем мире, кроме Америки; на начало 1997 г. он использовался примерно в 100 странах. Стандарт GSM 1800 используется в Европе (Англия, Германия, Франция, Швейцария, Финляндия, Дания, Украина, Россия), Юго-Восточной Азии (Малайзия, Таиланд, Сингапур, Гонконг) и Африке (Мозамбик), GSM 1900 – в США и Канаде.

Японская система PHS в сводку табл.5.2 не включена, как технически более близкая к беспроводному телефону, а не к сотовой связи. Ее основные характеристики были приведены в разд.4.6.

Таким образом, во втором поколении сотовой связи, как и в первом, довольно четко прослеживаются три направления развития сотовой связи, которые, однако, начинают более активно выходить за пределы своих «первоначальных ареалов», и не только в страны «третьего мира»:

«североамериканское» – стандарты D-AMPS и CDMA, которые находят применение и в Восточной Европе, в том числе в России;

«европейское» – стандарт GSM, активно внедряющийся и на американский рынок (GSM 1900);

«японское» – стандарты PDC и PHS, причем второй из них, по-видимому, сумеет выйти за пределы национальных границ.

5.2. Характеристики мирового рынка сотовой связи

Характеризуя современный мировой рынок сотовой связи, мы прежде всего должны отметить чрезвычайно широкое распространение последней. Стартовав в 1978 – 1983 гг. в США, Канаде, Японии, Западной Европе, сегодня сотовая связь в той или иной степени используется практически во всех странах всех континентов. Динамика роста числа стран, в которых применяется сотовая связь, иллюстрируется рис. 5.1 [147].

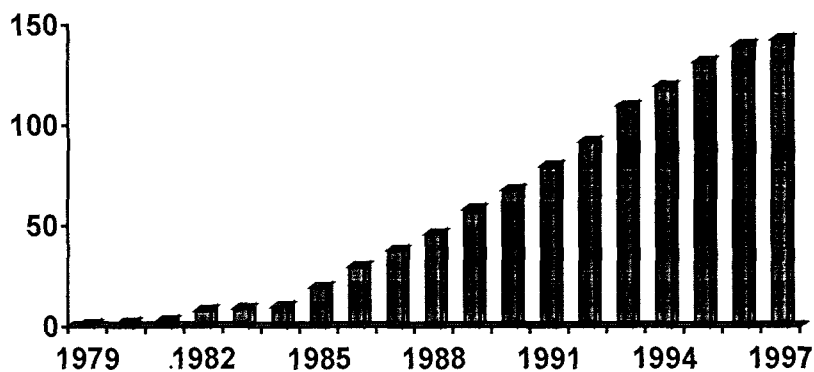


Рис. 5.1. Число стран мира, использующих сотовую связь

Вторая, и очень показательная, характеристика рынка сотовой связи, на которой мы остановимся, – число абонентов, или, как еще говорят, величина абонентской базы. В разд. 1 мы уже

приводили соответствующие данные для мира в целом и для отдельных стран (рис. 1.1, 1.2, 1.3). Из этих данных видна как абсолютная величина абонентской базы, так и динамика ее развития, которая может характеризоваться, например, относительным годовым приростом. Не повторяя всей уже известной информации, отметим только, что в середине 1997 г. в мире было почти 167 миллионов абонентов сотовой связи (без учета японской системы PHS), а прирост абонентской базы за год (с середины 1996 г. до середины 1997 г.) составил 53 %, т.е. она возросла в 1,53 раза.

В дополнение к этому приведем данные по 10 странам с наибольшей абсолютной абонентской базой (табл. 5.4) и по 10 странам с наибольшим уровнем проникновения (*penetration*) сотовой связи (табл. 5.5), т.е. с наибольшим относительным числом абонентов (проникновение в процентах – это число абонентов сотовой связи на 100 жителей).

Таблица 5.4. Десять стран с наибольшей абсолютной абонентской базой сотовой связи (на 1 июля 1997 г.)

№	Страна	Число абонентов, млн	Численность населения, млн	Проникновение, %	Годовой прирост числа абонентов, %
1	США	50,9	256	19,9	35
2	Япония	23,5	124	18,9	85
3	Китай	10,0	1180	0,9	95
4	Италия	8,2	57	14,4	70
5	Англия	7,4	59	12,6	20
6	Германия	6,5	83	7,9	40
7	Австралия	4,9	18	28,0	30
8	Ю. Корея	4,3	44	9,9	80
9	Канада	3,7	28	13,4	20
10	Испания	3,6	39	9,0	110

Таблица 5.5. Десять стран с наибольшим уровнем проникновения сотовой связи (на 1 июля 1997 г.)

№	Страна	Проникновение, %	Численность населения, млн	Число абонентов, млн	Годовой прирост числа абонентов, %
1	Финляндия	34,8	5	1,8	40
2	Норвегия	31,3	4	1,4	30
3	Швеция	29,9	9	2,6	20
4	Израиль	29,0	5	1,5	130
5	Гонконг	28,1	6	1,6	65
6	Австралия	28,0	18	4,9	30
7	Дания	25,3	5	1,3	15
8	Исландия	20,8	0,2	0,05	45
9	США	19,9	256	50,9	35
10	Япония	18,9	124	23,5	85

Для большей информативности мы даем в обеих таблицах и абсолютные, и относительные значения абонентской базы, а также ее прирост за год и численность населения по всем рассматриваемым странам.

Третья характеристика, или, точнее, группа характеристик – распределение абонентской базы по стандартам, а также между аналоговыми и цифровыми стандартами – показывает распространенность соответствующих систем сотовой связи и тенденции их развития. Соответствующие данные мы приводим в виде ряда диаграмм (рис. 5.2, 5.3, 5.4, 5.5).

Мы видим, что в мире в целом доминирует стандарт AMPS/D-AMPS, ему принадлежит почти половина абонентской базы (рис. 5.2); второе место занимает GSM, третье – японские стандарты, а на долю всех остальных, вместе взятых, остается 9 %.

В США преобладание AMPS/D-AMPS значительно резче, другим стандартам (CDMA, GSM 1900) остается всего 2 % абонентской базы. В Западной Европе преобладает GSM, хотя доля других стандартов (это аналоговые стандарты первого поколения) пока весьма заметна – 26 %.

Если говорить о соотношении аналоговых и цифровых систем, то в мире в целом они пока распространены почти одинаково (55 и 45 %, рис. 5.3), хотя темпы роста цифровых систем значительно выше (12 и 150 % за год соответственно, рис. 5.4).

В США аналоговые системы доминируют (90 %), но по темпам роста цифровые системы идут впереди (125 % по сравнению с 23 % для аналоговых систем).

В Западной Европе, напротив, преобладают цифровые системы (стандарт GSM, 75 %), а абонентская база аналоговых систем убывает (-25 % за год). Заметим попутно, что наиболее велика доля цифровых систем в Японии (85 %, включая PHS), как и относительный годовой прирост абонентской базы цифровых систем (230 %), что непосредственно связано с выходом на рынок системы PHS.

Еще одной иллюстрацией той же проблемы является рис. 5.5, который по существу повторяет рис. 1.1, но с разделением абонентской базы между аналоговыми и цифровыми системами. Из него наглядно видно, что в последние год-два темпы роста аналоговых систем заметно снизились, а основной прирост абонентской базы сотовой связи обусловлен цифровыми системами.

Становление и развитие сотовой связи обеспечиваются в основном двумя группами активных участников этого процесса (не считая законодательно регулирующих и стандартизирующих организаций, статус которых достаточно очевиден): компаниями-операторами (*operators*, или *carriers*) и компаниями-производителями аппаратуры и оборудования (*manufacturers*, или *vendors*).

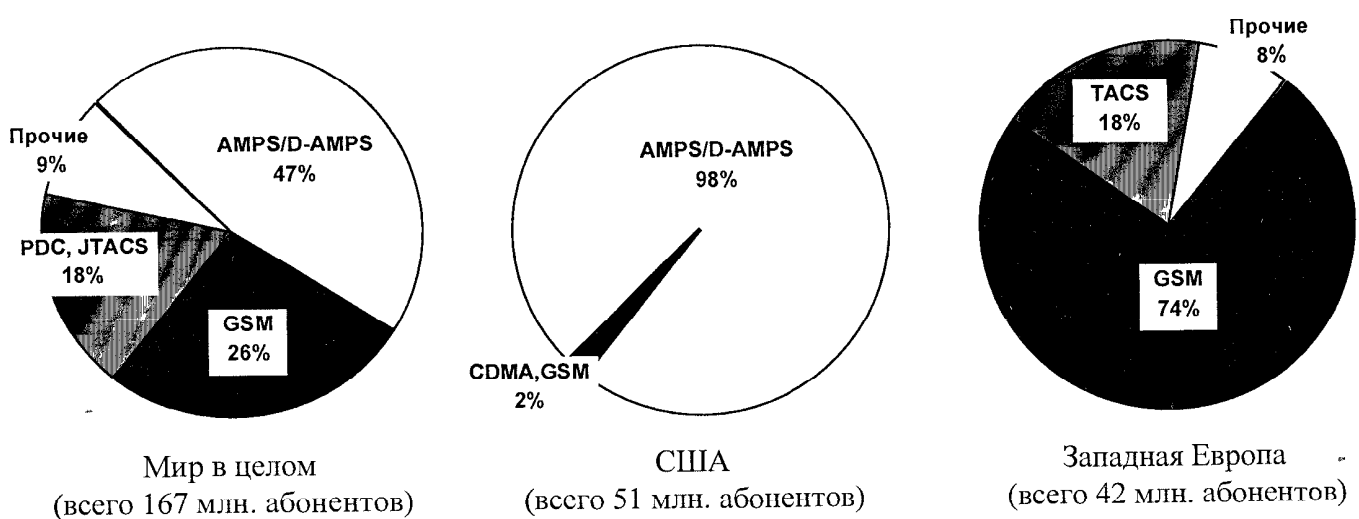


Рис 5 2 Распределение абонентской базы сотовой связи по основным стандартам (1 июля 1997 г., мир в целом, США, Западная Европа)

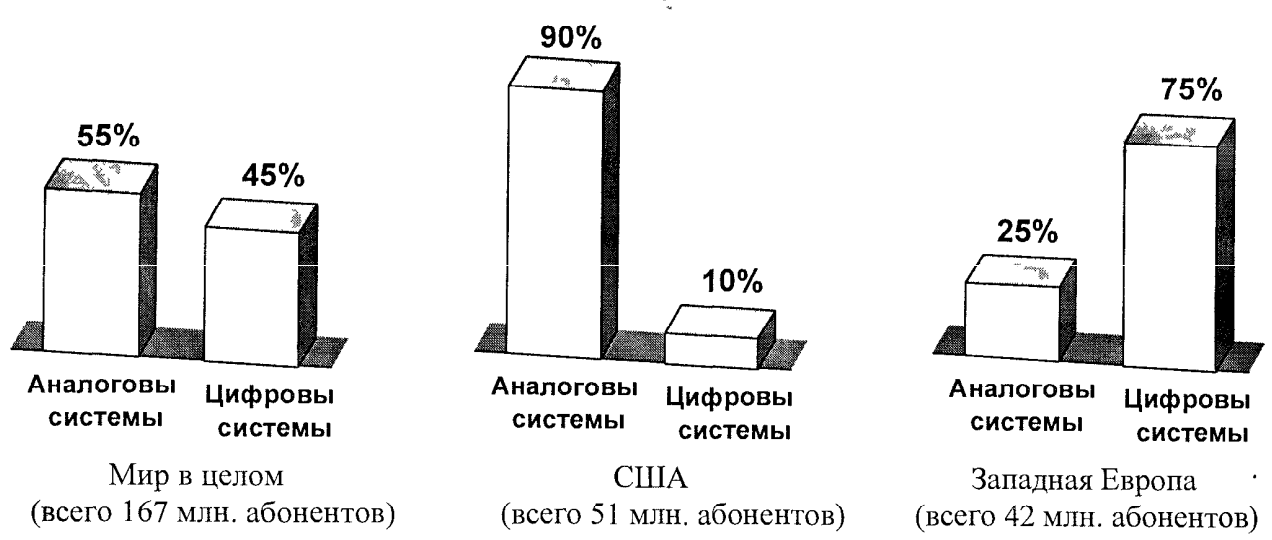


Рис 5 3 Распределение абонентской базы сотовой связи между аналоговыми и цифровыми системами (1 июля 1997 г., мир в целом, США, Западная Европа)

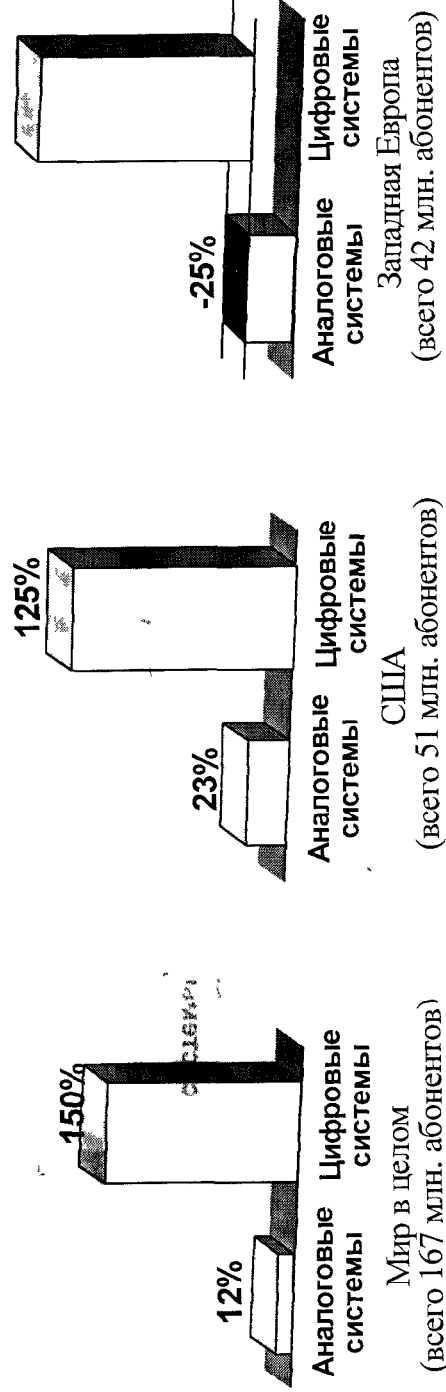


Рис 5.4. Относительный годовой прирост абонентской базы сотовой связи для аналоговых и цифровых систем (1 июля 1997 г.: мир в целом, США, Западная Европа)

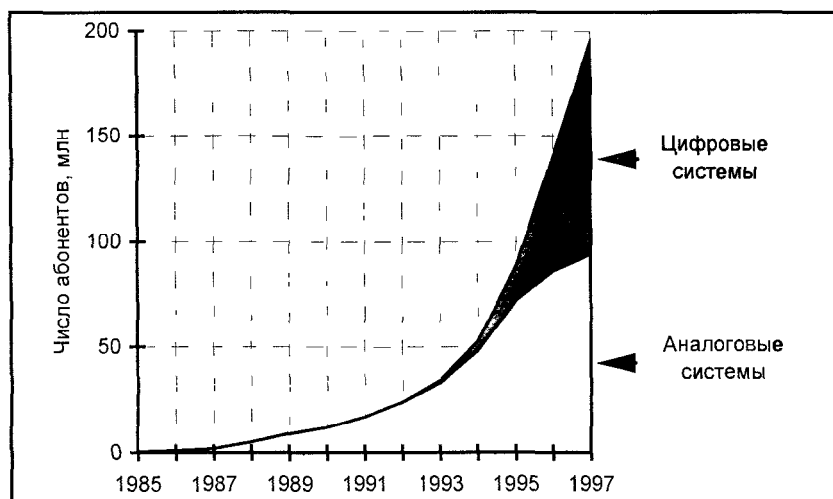


Рис. 5 5. Динамика роста абонентской базы сотовой связи мира для аналоговых и цифровых систем

Компании-операторы обычно действуют в пределах одной страны или даже в пределах некоторого региона (или нескольких регионов) внутри страны, хотя в последнее время все чаще встречаются случаи выхода операторов за пределы национальных границ.

В большинстве случаев число операторов в стране не превышает трех-четырех, реже — пяти-шести. Например, в Англии действует четыре оператора, в Германии и Франции — по три, в Италии — два; всего на 23 страны Западной Европы приходится 40 операторов.

Исключения составляют США и Россия, число операторов в которых исчисляется десятками. Для иллюстрации сегодняшней ситуации на мировом рынке сотовой связи в табл. 5.6 мы приводим список десяти крупнейших компаний-операторов.

Компании-производители аппаратуры и оборудования, национальные по своим корням, как правило, выступают на рынках нескольких (или даже весьма многих) стран. Некоторые из компаний имеют и производственные отделения или филиалы в других странах. В табл. 5.7 приводится список десяти крупнейших компаний-производителей аппаратуры и оборудования.

Характерной чертой развития сотовой связи является создание союзов (ассоциаций, альянсов), объединяющих компании, взаимодействующие на рынке.

Таблица 5.6. Десять крупнейших в мире компаний-операторов сотовой связи [172]

№	Оператор	Страна	Число абонентов на 1 июля 1997 г., тыс
1	NTT DoCoMo	Япония	12679
2	Telecom Italia Mobile	Италия	7360
3	China Telecom	Китай	7190
4	AT&T	США	5600
5	Bell Atlantic Mobile	США	4875
6	SBC Communications	США	4838
7	GTE Mobilnet	США	4146
8	BellSouth	США	3901
9	AirTouch	США	3745
10	SK Telecom	Ю. Корея	3673

Таблица 5.7. Десять крупнейших в мире компаний-производителей телекоммуникационного оборудования [167]

№	Компания	Страна	Доход за 1995 г. млн. долл.	Прирост дохода 1995/1994, %
1	Motorola	США	16422	20
2	Lucent Technologies	США	16359	7
3	Alcatel	Франция	15631	-6
4	Ericsson	Швеция	13467	20
5	NEC	Япония	11494	20
6	Siemens	Германия	11470	-8
7	Nortel	Канада	10699	21
8	Fujitsu	Япония	5845	25
9	Nokia	Финляндия	5706	50
10	Philips	Нидерланды	4988	2

Отметим основные из них:

- GSM MoU Association – международная Ассоциация операторов стандарта GSM; созданная в 1987 г., в сентябре 1997 г. Ассоциация объединяла 256 компаний-операторов стандартов GSM 900, GSM 1800 и GSM 1900 из 110 стран мира;
- UWCC (Universal Wireless Communication Consortium) – международная ассоциация производителей аппаратуры и операторов стандарта D-AMPS (IS-136), созданная в 1995 г. и объединяющая 72 компании (середина 1997 г.);
- CDG (CDMA Development Group) – Группа развития стандарта CDMA, образованная в 1995 г. и объединяющая 75 компаний-производителей аппаратуры и операторов стандарта IS-95 (середина 1997 г.); весной 1997 г. Всемирный конгресс CDMA принял решение о продвижении систем на базе стандарта IS-95 под единой торговой маркой «cdmaOne»;

- GSM Alliance (Альянс GSM) – объединение операторов, производителей оборудования и компании Intel Corp. (производитель микросхем), учрежденное в августе 1997 г. с целью продвижения стандарта GSM 1900 в Северной Америке; создание Альянса не упраздняет образованной ранее группы GSM North America (GSM Северная Америка);
 - MDI (Mobile Data Initiative – Инициатива передачи данных в мобильной связи) – объединение операторов стандарта GSM (Европейская и Североамериканская ветви) в поддержку технологий передачи данных в стандарте GSM.
- Наконец, нельзя не отметить непрерывное совершенствование набора услуг и формы их представления, в том числе:
- появление новых услуг и расширение области применения существующих (передача данных, доступ к сети Интернет, электронная почта, развитие роamingа и т.д.);
 - разнообразие тарифных планов, рассчитываемых, в частности, на определенные группы пользователей (бизнес-сектор, бытовой сектор, корпоративный сектор и т.п.);
 - явная тенденция к удешевлению услуг и упрощению структуры тарифных планов, введение пакетов услуг (bundled services, или packaged services), а также пакетов с предоплатой (prepaid packages), не требующих заключения контрактов и соответственно проверки кредитоспособности абонентов.

5.3. Сотовая связь в России

Сотовая связь в России начала развиваться с 1990 г., и до 1997 г. у нас существовали сети трех стандартов: NMT 450, GSM 900, AMPS/D-AMPS; в 1997 г. к ним добавились GSM 1800 и CDMA.

Первая коммерческая сеть сотовой связи в России была запущена в сентябре 1991 г. – это Санкт-Петербургская сеть компании «Дельта Телеком» стандарта NMT 450. В январе 1992 г. началась коммерческая эксплуатация сети оператора «Московская Сотовая Связь» (МСС) того же стандарта в Москве. Освоение диапазона 800 МГц началось в 1993 г. с вводом компанией «ВымпелКом» экспериментальной сети стандарта AMPS в Москве. В 1994 г. в этом стандарте работало уже несколько сетей: с февраля – в Нижнем Новгороде («Персональные системы связи в России»), с мая – в Челябинске («Челябинская сотовая связь»), с июня – в Санкт-Петербурге (оператор «Санкт-Петербург Телеком», торговая марка «ФОРА»). Московская компания «ВымпелКом», выступающая под торговой маркой «Би Лайн», начала коммерческую эксплуатацию сети AMPS/D-AMPS в июне 1994 г., и уже в сентябре того же года перешла на цифровой стандарт D-AMPS – это была

первая цифровая сеть сотовой связи в России. Этап коммерческой эксплуатации для стандарта GSM 900 начался в декабре 1994 г., когда была запущена Санкт-Петербургская сеть компании «Северо-Западный GSM». Московская сеть того же стандарта начала коммерческую работу в январе 1996 г. (оператор «Мобильные ТелеСистемы» – МТС).

Всего в России на середину 1997 г. приходилось около 300 тысяч абонентов сотовой связи, что соответствует проникновению 0,2 %. Это очень мало: по величине проникновения мы находимся на уровне Гондураса и Марокко, опережая такие страны, как Индия, Пакистан, Бангладеш, Алжир, Заир (все менее 0,1 %), но уступая Индонезии (0,5 %), Китаю (0,8 %) и многим-многим другим странам; проникновение в среднем для мира – 3,5 %. Динамика роста абонентской базы иллюстрируется рис. 5.6. Из 89 регионов России сотовая связь в той или иной мере представлена в 73 регионах, хотя для разных стандартов ситуация различна (табл. 5.8).

Распределение абонентской базы по стандартам показано на рис. 5.7, распределение между аналоговыми и цифровыми системами – на рис. 5.8, относительный годовой прирост абонентской базы для аналоговых и цифровых систем – на рис. 5.9. Рисунок 5.10 иллюстрирует динамику роста абонентской базы трех стандартов, рис. 5.11 – тот же показатель для аналоговых и цифровых систем.

Как следует из приведенных данных, соотношение между аналоговыми и цифровыми системами примерно соответствует среднемировым показателям, хотя по темпам роста цифровые системы пока выступают менее активно, чем в среднем в мире.

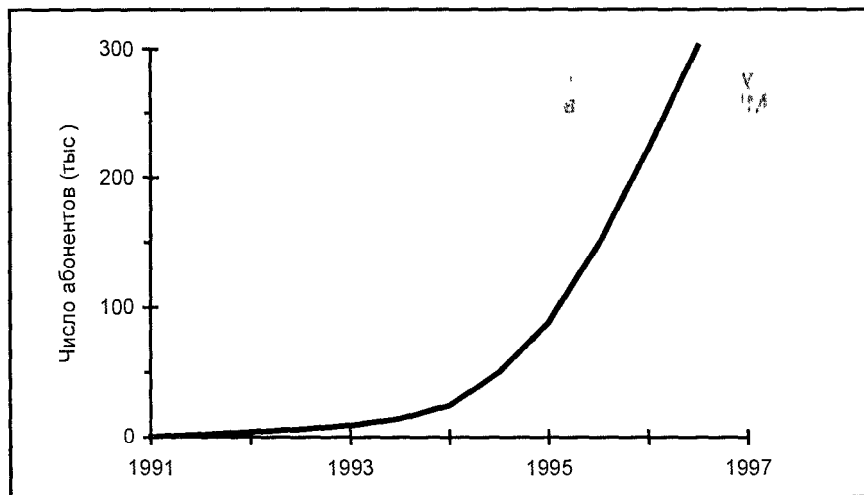


Рис. 5.6. Динамика роста абонентской базы сотовой связи России

Таблица 5.8. Лицензии и действующие сети сотовой связи России (середина 1997 г.)

Стандарт	Число регионов, имеющих лицензии	Число регионов, имеющих действующие сети
NMT 450	70	48
AMPS/D-AMPS	65	42
GSM 900	60	22
GSM 1800	4	1
CDMA (800)	7	-
Всего	79	73
Примечание. общее число регионов, имеющих лицензии или действующие сети, не равно сумме числа регионов по отдельным стандартам, поскольку в одном и том же регионе могут существовать сети или лицензии нескольких стандартов.		

В 1997 г., как мы уже упоминали, в России появились сети сотовой связи стандартов GSM 1800 и CDMA. Опытно-коммерческая эксплуатация первой сети стандарта GSM 1800 начата в июне 1997 г. в Москве – это сеть «Би Лайн 1800» группы компаний «ВымпелКом»; в отличие от нее сеть стандарта D-AMPS того же оператора получила наименование сети «Би Лайн 800».

В сентябре 1997 г. начата коммерческая эксплуатация первой сети стандарта CDMA диапазона 800 МГц (Челябинск, компания «Южноуральский сотовый телефон» – услуги стационарной сотовой связи). Число компаний-операторов в России, практически соответствующее числу сетей сотовой связи, составляет более 100. В табл. 5.9 представлен список десяти операторов, наиболее крупных по числу абонентов.

Мы видим, что в эту десятку попадают три московских и три Санкт-Петербургских оператора. Своих производителей аппаратуры сотовой связи в России фактически нет, хотя некоторые компании разрабатывают и изготавливают отдельные составляющие элементы (антенны, блоки базовых станций и т.п.); основной объем аппаратуры и программного обеспечения – импортный, с национальной сертификацией в соответствии с действующими у нас правилами.

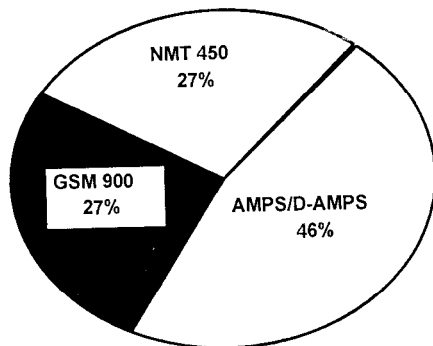


Рис 5 7 Распределение абонентской базы сотовой связи России по стандартам (1 июля 1997 г , всего 300 тыс абонентов)

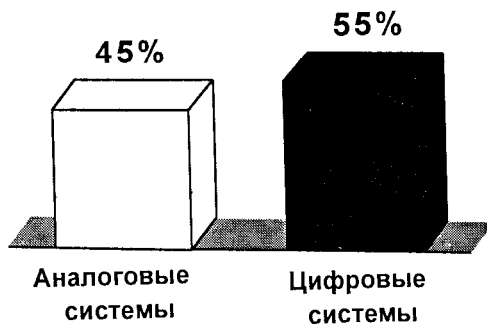


Рис 5 8 Распределение абонентской базы сотовой связи России между аналоговыми и цифровыми системами (1 июля 1997 г , всего 300 тыс абонентов)

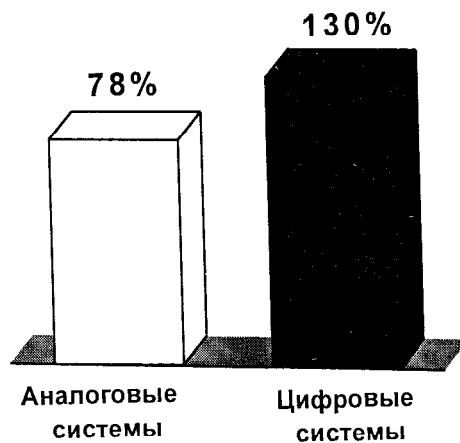


Рис 5 9 Относительный годовой прирост абонентской базы сотовой связи России для аналоговых и цифровых систем (1 июля 1997 г , всего 300 тыс абонентов)

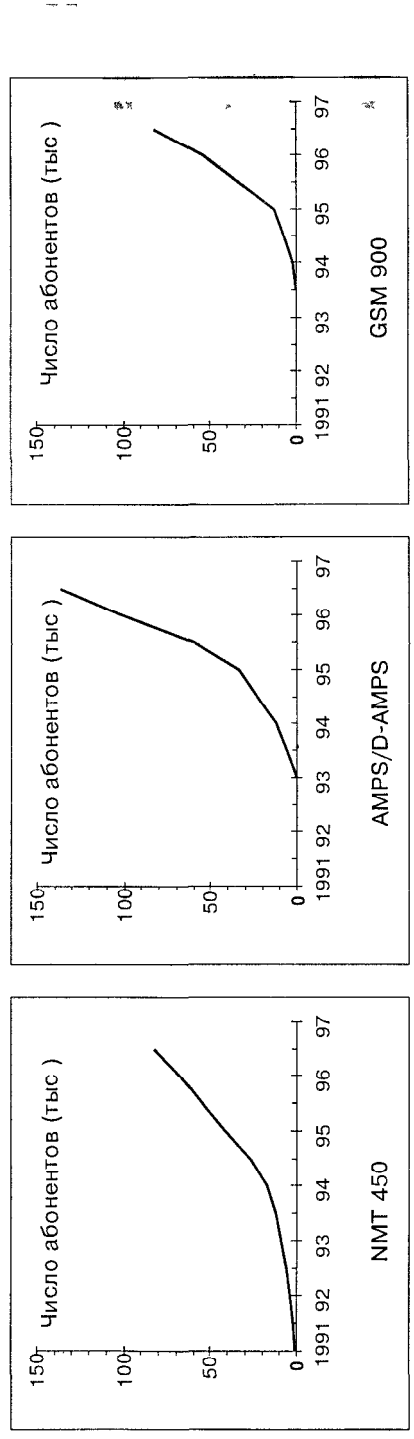


Рис 5 10 Динамика роста абонентской базы сотовой связи России для трех стандартов

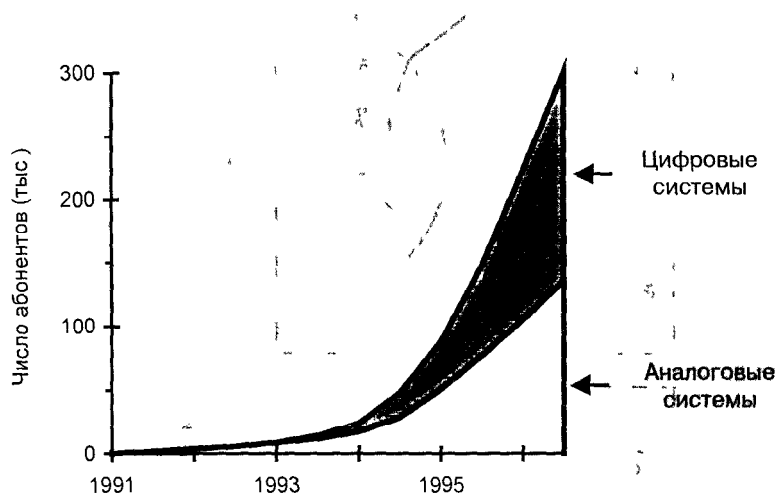


Рис.5.11 Динамика роста абонентской базы сотовой связи России для аналоговых и цифровых систем

Таблица 5.9. Десять операторов сотовой связи России, первых по величине абонентской базы

№	Оператор	Регион	Стандарт	Примерное число абонентов (1 июля 1997 г.)
1	«ВымпелКом» (торговая марка «Би Лайн»)	Москва и Московская область	D-AMPS	73600
2	«Северо-Западный GSM»	Санкт-Петербург и Ленинградская область	GSM 900	35000
3	«Мобильные Теле-Системы (МТС)»	Москва и Московская область	GSM 900	33000
4	«Дельта Телеком»	Санкт-Петербург и Ленинградская область	NMT 450	32000
5	«Московская Сотовая Связь» (МСС)	Москва и Московская область	NMT 450	28500
6	«Санкт-Петербург Телеком» (торговая марка «ФОРА»)	Санкт-Петербург и Ленинградская область	AMPS	14000
7	«Татинком»	Татарстан	D-AMPS	9500
8	«Сотовая компания»	Новосибирская область	AMPS	5000
9	«АКОС»	Приморский край	AMPS	4000
10	«Билайн-Самара»	Самарская область	AMPS	3500

Развитие сотовой связи в стране в целом задается принятой в начале 1994 г. «Концепцией развития в России до 2010 г. сетей сухопутной подвижной радиосвязи общего пользования», которой, в частности, определяется разделение сетей на *федеральные* и *региональные* с построением федеральных сетей на базе стандартов NMT 450 и GSM 900, и региональных – на базе AMPS/D-AMPS [2, 23, 61, 4 и др.]. В 1997 г. статус федерального получил и стандарт GSM 1800. Инструментами проведения государственной политики в развитии сотовой связи являются *лицензирование* и *сертификация*. Существует специальное Управление подвижной и беспроводной электросвязи, до марта 1997 г. входившее в состав Министерства связи, а после реорганизации – во вновь образованный Государственный комитет Российской Федерации по связи и информатизации (Госкомсвязи России). Одной из особенностей, серьезно затрудняющих развитие сотовой связи в нашей стране, является сложность выделения полос частот в пределах диапазонов, используемых существующими системами сотовой связи. Решение проблемы «конверсии радиочастотного спектра» требует значительных усилий, времени и средств.

Наряду с упоминавшимися ранее международными ассоциациями, членами которых является и ряд российских компаний-операторов, существуют отечественные ассоциации операторов [8, 6, 59]:

- Ассоциация операторов стандарта GSM 900, созданная в сентябре 1994 г.; в октябре 1997 г. в Ассоциацию входило 39 операторов сетей GSM 900 и 4 ассоциированных члена;
- Ассоциация операторов стандарта NMT 450, учрежденная в конце 1994 г. и объединявшая в середине 1997 г. 52 компании-оператора;
- Ассоциация-800 – некоммерческое объединение предприятий, занимающихся развитием и эксплуатацией систем сетей подвижной сотовой связи стандарта AMPS/D-AMPS в России и других странах СНГ (диапазон 800 МГц); Ассоциация учреждена в феврале 1995 г. и на октябрь 1997 г. объединяла 51 предприятие России и ряда стран СНГ (Киргизия, Грузия, Узбекистан, Казахстан).

В заключение следует отметить, что, хотя по развитию сотовой связи Россия отстает от ведущих стран примерно на десять лет, по некоторым характеристикам, например по соотношению аналоговых и цифровых систем, мы не повторяем всего эволюционного пути развития, а идем даже впереди среднемировых показателей, уступая, правда, передовым в этом отношении Японии и Западной Европе. При этом развитие сотовой связи не только сопутствует переходу нашей экономики на путь рыночных отношений, не только отражает этот переход, но и активно ему способствует, предоставляя эффективную возможность оперативной связи, столь необходимой и ценной в сегодняшней динамичной обстановке, при ее быстром и часто неожиданном изменении.

Глава 6 КАК БУДЕТ РАЗВИВАТЬСЯ СОТОВАЯ СВЯЗЬ?

6.1. Оценки и прогнозы

Познакомившись с историей, техникой и сегодняшним состоянием рынка сотовой связи, мы вплотную подошли к оценке ее возможностей в будущем. Перспективы развития сотовой связи – один из самых актуальных и в то же время непростых вопросов из всего круга проблем мобильной связи. Этот вопрос, небезразличный, конечно, и для пользователей сотовой связи, в гораздо большей степени затрагивает интересы профессионалов, занимающихся ее развитием, – операторов, производителей аппаратуры, инвесторов. Надо сказать, что прогнозов сегодня хватает, причем самых разнообразных, на любой вкус. Единственное, пожалуй, в чем они безусловно совпадают, – это уверенное предсказание продолжения роста и развития сотовой связи.

Впрочем, прогнозы были всегда, начиная с первых шагов сотовой связи, и первые прогнозы были очень смелыми. Именно эта смелость позволила в свое время решиться на такой радикальный шаг, как создание системы сотовой связи, с его серьезными перспективами и значительными капиталовложениями. И тем не менее всегда, на всем протяжении развития сотовой связи, реальная жизнь оказывалась богаче и быстрее, заметно опережая самые смелые прогнозы. Приведем несколько примеров [136, 127, 174 и др.]. В самом начале 80-х годов было широко распространено убеждение, что к 2000 году число абонентов сотовой связи сможет достигнуть 900 тыс. Между тем, как мы теперь знаем, уже в середине 1997 г. число абонентов в мире превысило 165 млн. В 1994 г., когда число абонентов стандарта GSM 900 приближалось к 5 млн. и стало ясно, что стандарт выходит за пределы Европы и начинает применяться по всему миру, один из прогнозов утверждал, что к 2000 г. только в Европе число абонентов составит 22,5 млн. Однако уже в сентябре 1997 г. число абонентов стандарта GSM в Европе превысило 37 млн., в том числе GSM 900 – более 34 млн. В начале 1996 г., когда число абонентов сотовой связи в мире приближалось к 100 млн., предсказывалось, что в 2000 г. оно будет более 250 миллионов. В действительности, если сохранятся существующие темпы роста, а это весьма вероятно, рубеж в 250 млн. будет пройден уже в 1998 г.

Сегодня ситуация с прогнозами заметно меняется. Сказывается приобретенный опыт: сотовая связь используется уже не один год, она получила широкое распространение, накоплен богатый статистический материал по разным странам и по миру в целом. Существуют специалисты, коллективы и целые компании, занимающиеся изучением рынка и прогнозом его роста. Появились методики анализа и прогноза, учитывающие специфические особенности сотовой связи и основные факторы ее развития. Помимо традиционной сотовой связи диапазонов 450, 800 и 900 МГц сфера анализа охватывает персональную связь (диапазоны 1800 и 1900 МГц), а также смежные технологии – беспроводной телефон и мобильную спутниковую связь. Правда, при всем этом неожиданности все равно неизбежны и естественны, как, например, успех системы PHS в Японии и сопутствующий ему всплеск в развитии сотовой связи (1995 – 1997 гг.), или быстрый рост абонентской базы в Италии, вышедшей за последний год на первое место в Западной Европе (9,7 млн. абонентов на 1 октября 1997 г., что примерно на 30 % больше, чем у следующих за ней Англии и Германии).

Каким же образом производится прогнозирование развития сотовой связи, каковы методические основы построения прогнозов? Надо сказать, что, хотя число публикуемых прогнозов достаточно велико, методики их построения не особенно обнародуются. Во всяком случае, среди известных публикаций нам не встретилось ни одного подробного описания такого рода методики. Можно полагать, что наряду с простейшими подходами типа линейной экстраполяции используются и весьма сложные и тонкие, с учетом множества факторов, таких как величина и распределение доходов различных групп населения, корреляция с владением движимой и недвижимой собственностью, родом деятельности, возрастом и т.п. Широко используются разного рода социологические опросы, экспертные оценки, обязательно учитываются достигнутый уровень развития, потребности различных категорий пользователей в услугах связи, а также все доступные сведения о планах и намерениях компаний, участвующих в развитии отрасли. В наиболее совершенных методиках вся совокупность факторов и параметров закладывается в компьютерные модели развития рынка, характеристики которых могут варьироваться для оценки и сопоставления различных вариантов. Результаты выполняемого таким образом анализа обычно бывают в достаточной степени состоятельными и надежными, и в необходимых случаях их можно использовать для выбора оптимальной стратегии действий. В отличие от них результаты простейших подходов дают лишь ориентировочные прогнозы «исходя из достигнутого». Линейная экстраполяция, обычно в применении к относительному приросту абонентской базы, дает более или менее приемлемые результаты в пределах одного-двух кварталов. Для прогнозов на большие промежутки времени используются более сложные методы экстраполяции, например с

постоянными вторыми разностями; с примером такого прогноза мы встретимся ниже.

Приведем теперь конкретные примеры прогнозов на последующие годы [119, 124, 171, 110, 91, 144, 81 и др.].

На рис. 6.1 показан прогноз компании The Strategis Group до 2002 года. Согласно этому прогнозу общее число абонентов достигнет 520 миллионов, а доля цифровых стандартов составит 88 %, причем почти половина общей абонентской базы будет приходиться на долю стандарта GSM (рис. 6.2). Еще более смелые прогнозы (рис. 6.3) принадлежат компаниям Ericsson (590 млн. абонентов в 2001 г.) и Herschel Shosteck Associates (620 млн. в 2001 г.). Последний прогноз, более подробно представленный в табл. 6.1, является примером прогноза с постоянными разностями относительного годового прироста абонентской базы.

В Западной Европе, по прогнозу UMTS Forum, в конце 2000 г. будет 115 млн. абонентов сотовой связи. Для 16 стран Европейского сообщества (Австрия, Англия, Бельгия, Германия, Греция, Дания, Ирландия, Испания, Италия, Нидерланды, Норвегия, Португалия, Финляндия, Франция, Швеция, Швейцария) инвестиционный банк Salomon Brothers (США) предсказывает в 2000 г. 90,5 млн. абонентов. Правда, последний прогноз, по-видимому, несколько устарел, поскольку, например, для Финляндии он указывает уровень проникновения 35,9 % на конец 1998 г., а фактически уже 1 октября 1997 г. было достигнуто 38,2 %.

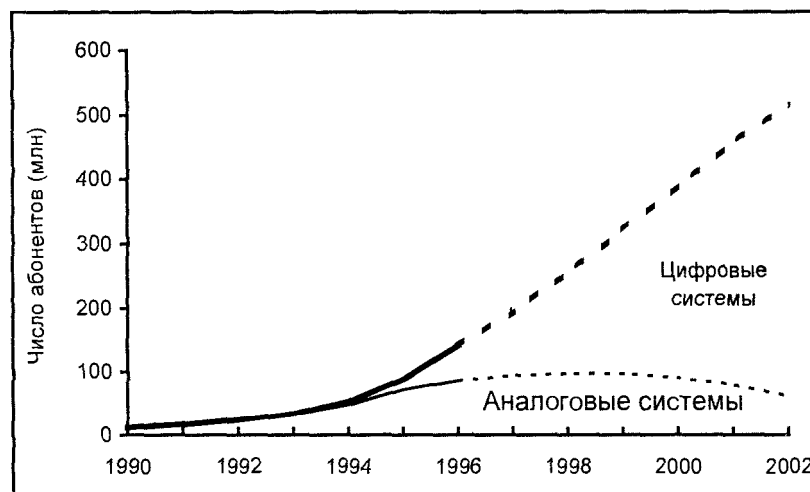


Рис. 6.1. Прогноз роста абонентской базы сотовой связи мира до 2002 г. (данные компании The Strategis Group)

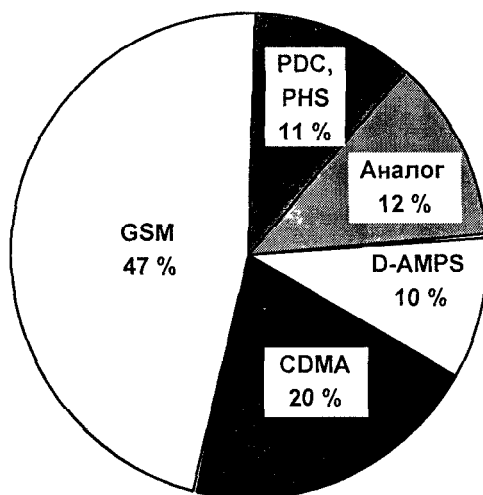


Рис. 6.2. Прогноз распределения абонентской базы сотовой связи мира по основным стандартам в 2002 г. (данные компании The Strategis Group)

Таблица 6.1. Динамика роста абонентской базы сотовой связи мира за период 1990 – 1996 гг. и прогноз до 2001 г. (данные компании Herschel Shosteck Associates)

Год	Число абонентов, млн.	Абсолютный годовой прирост, млн	Относительный годовой прирост, %	Разности относительного годового прироста, %
1990	11,6	-	-	-
1991	16,1	4,5	38,9	-
1992	23,0	6,9	42,5	+ 3,6
1993	34,2	11,2	48,8	+ 6,3
1994	54,8	20,6	60,3	+11,5
1995	86,4	31,8	58,1	- 2,2
1996	136,1	49,7	57,5	- 0,6
1997	207	71	52	- 5,5
1998	298	91	44	- 8
1999	405	107	36	- 8
2000	519	114	28	- 8
2001	622	103	20	- 8

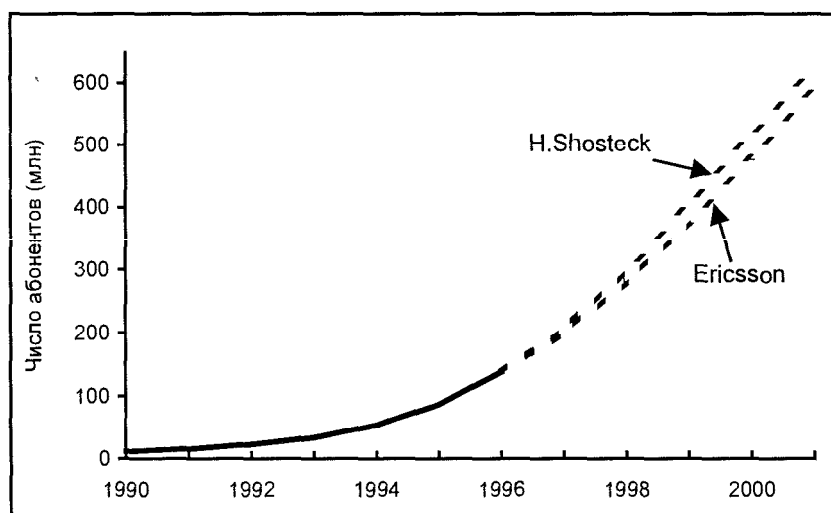


Рис. 6.3. Прогноз роста абонентской базы сотовой связи мира до 2001 г. (данные компаний Herschel Shosteck Associates и Ericsson)

Скандинавские страны вообще отличаются высоким уровнем проникновения сотовой связи, и поэтому прогнозы дальнейшего развития для них представляются особенно интересными. При сегодняшнем уровне проникновения 25...38 % не было бы удивительным, если бы их рынки считались близкими к насыщению. Тем не менее прогноз компании Baskerville Communications Corp. дает для 2000 года следующие показатели проникновения: Финляндия – 55,1 %, Швеция – 54,0 %, Норвегия – 53,6 %, Дания – 51,2 %, а на 2005 год предсказывается уровень проникновения 70...75 %. Для России на конец 2005 года прогнозируется общий объем абонентской базы сотовой связи 4 млн., что соответствует проникновению 2,7 %. Приведем еще данные прогноза компании Ovum по числу абонентов мобильной спутниковой связи: 1998 г. – 130 тыс., 2002 г. – 8 миллионов абонентов.

Разумеется, хорошие прогнозы важны и необходимы, но все же они остаются лишь прогнозами, не более того. Множество факторов, порой трудно учитываемых или субъективных, вносит в них заметные коррективы. Очевидно также, что сегодняшние темпы роста не могут сохраниться в течение сколько-нибудь длительного времени, в противном случае уже буквально за ближайшие пять-десять лет во многих странах был бы достигнут 100 %-ный уровень проникновения, чего не может быть в принципе. И тем не менее, масштабы роста и развития сотовой связи впечатляют, и

предстоящий в ближайшие пять или десять лет прогресс несомненен. Что же касается неизбежного замедления количественного роста, если не в среднем в мире, то по крайней мере в наиболее продвинутых странах, то основной прогресс, по всей видимости, переместится в область роста качественного, некоторые направления которого мы рассмотрим ниже.

6.2. Персональная связь и третье поколение мобильной связи

Мы уже отмечали ранее, что дальнейшие перспективы сотовой связи непосредственно связаны с развитием персональной связи и систем мобильной связи третьего поколения. Обсудим теперь эти направления подробнее.

Начнем с персональной связи. Что прежде всего понимается под этим названием? Общепринятого лаконичного определения персональной связи пока нет, хотя смысл этого понятия, описываемый не всегда с исчерпывающей полнотой и часто излишне многословно, можно, по-видимому, считать устоявшимся. Приведем в качестве примера несколько определений, принадлежащих разным источникам [120, 114].

Компания Pacific Telelink Limited, гонконгский оператор общественной беспроводной телефонной связи (telepoints): персональная связь – это «массовая беспроводная связь, недорогая и высокого качества, которой можно пользоваться всюду, где нужно, с использованием недорогих, компактных и легких аппаратов».

Английская компания Unitel Limited: «Телефон для человека, а не для места».

AUSTEL (Australian Telecommunications Authority – координирующий орган Австралии в области электросвязи): «Возможность предоставления связи в любом месте, в любое время, с кем угодно или с чем угодно, в соответствии с индивидуальными потребностями».

OFTA (Office of the Telecommunications Authority – законодательно регулирующая организация Гонконга): «Предоставление услуг персональной и портативной телефонной связи с большей степенью функциональной гибкости, чем у существующих систем мобильной или фиксированной связи, в сочетании с услугами последних или взамен их».

Федеральная комиссия связи США (Federal Communications Commission – FCC): «Семейство мобильных или портативных средств радиосвязи, которые могут обеспечить предоставление услуг отдельным пользователям и бизнес-группам, выступая в виде множества конкурирующих сетей. Основное внимание при этом должно быть сфокусировано на удовлетворении потребностей людей в связи, когда они находятся в движении».

Комиссия европейских сообществ (Commission of the European Communities – CEC): «Персональная связь предусматривает предоставление в будущем такого диапазона услуг связи, из которого можно гибко выделить и сформировать все, что нужно отдельным абонентам, чтобы пользоваться связью независимо от места нахождения или метода доступа. Существенным элементом этой точки зрения является обеспечение массового рынка благодаря общедоступности и низким ценам. ...Персональная связь в конечном итоге обеспечит возможность общения одного человека с другим, независимо от места их нахождения и используемых терминалов, способа передачи сигналов (по проводам или без проводов) и/или выбора технологии».

Ремсдейл и Поттер (P.Ramsdale, R.Potter): «Персональная связь не определяется какой-либо конкретной технологией: скорее, она описывается теми характеристиками, которые пользователь хотел бы видеть у конкретной системы связи. ...Радиопокрытие должно обеспечиваться как вне зданий (outdoors), так и внутри зданий (in buildings)».

Попытка обобщения, принадлежащая Хеддену (A.Hadden): «Персональная связь – это недорогой ответ на потребность в обеспечении связи (и управлении ею) между людьми, где бы они ни находились и что бы они ни делали, и между их терминалами в соответствии с индивидуальными потребностями абонентов, для удовлетворения массового рынка».

Все сказанное, безусловно, верно и в совокупности, возможно, даже исчерпывающе, но не дает прямого ответа на существенный вопрос – в чем же отличие персональной связи от сотовой, ибо практически все приведенные определения и требования при желании могут быть отнесены и к традиционной сотовой связи. Ключ к ответу, скорее всего, можно получить, проследив историческую канву развития сотовой связи. Первоначально она предназначалась только для автомобилистов, и абонентские терминалы были так тяжелы и громоздки, что их не только нельзя было поместить в карман, но даже и в руках носить было не очень удобно – они устанавливались в автомашине. Затем появились и заняли доминирующее положение *ручные аппараты (handsets)*, которые хорошо помещаются в кармане или в дамской сумочке. В результате абонент оказался «отвязанным» от автомашины: он получил возможность пользоваться сотовой связью при пешем перемещении по улице, в магазине, в офисе или дома. Разумеется, это расширило и область применения, и круг пользователей сотовой связи. С учетом расширения набора услуг и снижения цен, вполне реальной стала перспектива выхода сотовой связи на *массовый рынок (mass market)*, на *бытовой, или потребительский, сегмент пользователей (consumer segment)* – в противоположность *деловому сегменту, или бизнес-сегменту (business segment)*, который преобладал до того. Но тут всерьез маячила угроза недостаточной емкости сетей сотовой связи, и решение проблемы было найдено в виде разработки систем *пер-*

сональной связи. Технической основой последних является использование частотных диапазонов 1800...1900 МГц, с их большим затуханием при распространении радиоволн и соответственно меньшими размерами ячеек, что в сочетании с выделением новых и к тому же более широких рабочих полос частот обеспечивает существенно более высокую техническую емкость сетей.

Итак, под системами персональной связи в настоящее время фактически общепринято понимать системы сотовой связи диапазонов 1800 и 1900 МГц: это «европейский» стандарт GSM 1800 и «американские» стандарты GSM 1900, D-AMPS (1900) и CDMA (1900). В общих статистических характеристиках абонентской базы системы персональной связи обычно не выделяются, т.е. учитываются вместе с сотовыми. В техническом плане переход от «сотовых» диапазонов 800...900 МГц к «персональным» 1800...1900 МГц означает, почти без упрощения ситуации, смену приемопередатчиков и антенн. В маркетинговом же отношении – это качественный скачок от ограниченного рынка к массовому, от бизнес-сегмента к потребительскому, оценить все значение которого можно будет лишь спустя некоторое время.

Начав свой путь на рынке в Западной Европе в конце 1993 г. и в США в конце 1995 г., сегодня системы персональной связи обслуживают около 5 миллионов абонентов, или почти 3 % мировой абонентской базы сотовой связи. В Западной Европе сети стандарта GSM 1800 в 1998 г. будут иметь почти все страны. В Восточной Европе сети GSM 1800 действуют на Украине и в России, в 1998 г. должна быть запущена сеть в Польше. В США и Канаде работает в общей сложности около 100 сетей персональной связи более чем двадцати операторов. При этом уже с 1997 г. по показателю средней прибыли на абонента (Average Revenue Per User – ARPU) сети персональной связи США идут впереди сетей сотовой связи. Более 10 сетей GSM 1800 запущено или готовится к запуску в Юго-Восточной Азии (Малайзия, Таиланд, Сингапур, Гонконг, Тайвань), одна сеть – в Африке (Мозамбик). Выданы лицензии на персональную связь в Чили, ведется подготовка к выдаче лицензий в Индии, Аргентине, Мексике, Новой Зеландии, Австралии. Во многих случаях сети GSM 1800 создаются в координации с сетями GSM 900, вплоть до выдачи одним и тем же операторам лицензий на GSM 900 и GSM 1800 и создания совмещенных сетей GSM 900/GSM 1800. Преимущества последних вариантов поддерживаются уже имеющимися на рынке двухрежимными терминалами GSM 1800/GSM 900 и GSM 1900/GSM 900, в том числе с автоматическим переключением между сетями разных диапазонов. Имеются также трехрежимные терминалы D-AMPS 1900/D-AMPS 800/AMPS 800. В начале 1998 г. ожидается появление первых двухрежимных терминалов GSM 1900/AMPS, а в дальнейшем – и других вариантов двухрежимных и трехрежимных терминалов. Таким образом, в пределах обозримого будущего системы персональной связи снимают ограничения по емкости сетей сотовой связи, обеспечивая возможности развития массового рынка.

Перейдем к системам мобильной связи третьего поколения [87, 92, 95, 90, 137, 138, 168, 146, 166 и др.]. Работы в этом направлении были начаты в 1986 г. Международным союзом электросвязи (International Telecommunications Union – ITU). Соответствующая перспективная система мобильной связи была названа FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System – Наземная система мобильной общественной электросвязи будущего); в 1995 г. она была переименована в IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000 – Международная система мобильной электросвязи-2000). По той же проблеме с середины 80-х годов велась работа в Европейском институте стандартов электросвязи (European Telecommunications Standards Institute – ETSI). В 1991 г. Специальной группой мобильной связи Технического комитета ETSI (Technical Committee Special Mobile Group – TC SMG) был образован технический подкомитет SMG5 для разработки системы, получившей название UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – Универсальная система мобильной электросвязи). В 1996 г. был учрежден UMTS Forum – организация европейской промышленности электросвязи (объединение операторов, производителей и законодательных органов) в поддержку систем третьего поколения. В 1992 г. Всемирная административная конференция по радиочастотам (World Administrative Radio Conference-92 – WARC-92), под эгидой ITU, выделила для FPLMTS на всемирной основе полосу частот в 230 МГц в диапазоне 2 ГГц, в том числе 170 МГц (1885...1980, 2010...2025 и 2110...2170 МГц) для наземной составляющей системы, с реализацией ее примерно в 2000 году, и 60 МГц (1980...2010 МГц для направления Земля – космос и 2170...2200 МГц для направления космос – Земля) для последующего построения спутникового компонента ближе к 2010 году. В разработке систем третьего поколения активно участвует Ассоциация GSM MoU, имеющая соответствующую рабочую группу (группу интересов 3-го поколения – 3d Generation Interest Group, 3GIG) и тесно сотрудничающая с организацией UMTS Forum.

Таким образом, работа по системам третьего поколения ведется уже более десяти лет, и действительно сделано много, так что можно реально говорить о начале функционирования таких систем через три – пять лет, в 2000 – 2002 гг. Тем не менее формального общепринятого определения систем мобильной связи третьего поколения пока также нет, хотя смысл, вкладываемый в это понятие, трактуется практически одинаково всеми участниками работы. Предполагается фактически что системы третьего поколения смогут обеспечить мобильную связь со всеми мыслимыми видами услуг, с глобальным роумингом и широким набором возможностей мультимедиа, включая видеотелефон и видеоконференции, высокоскоростной доступ в Интернет и Интранет, передачу деловой, развлекательной и образовательной информации и т.п. Соответственно системы третьего поколения должны включать наземный и спутниковый сегменты и поддерживать скорости передачи информации до 64 Кбит/с без ограничений подвижности абонен-

тов, до 384 Кбит/с при ограниченной подвижности (скорость пешехода) и до 2 Мбит/с в неподвижном варианте, обладая достаточными для этого полосами каналов связи.

Идеальным, естественно, было бы согласование единого общемирового стандарта на системы третьего поколения. Сегодня, однако, уже ясно, что сделать этого не удастся, и потому принят курс на «семейство стандартов», но при условии, что все стандарты «семейства» должны быть совместимы между собой, с тем чтобы они могли не просто сосуществовать, а совместно функционировать в глобальном масштабе, включая глобальный роуминг. В этом одно из радикальных отличий от сегодняшней ситуации, когда существует ряд несовместимых между собой цифровых стандартов сотовой связи. Для обеспечения совместимости различных стандартов помимо выделения общих диапазонов частот и согласования требуемых скоростей передачи информации, о чем мы уже говорили, четко определены два главных компонента новой системы – *основа архитектуры сети (core network architecture)* и *радиоинтерфейс (radio interface)*, для каждого из которых сформулирован набор требований; удовлетворение последних как раз и приведет к требуемой совместимости. В пределах же указанных требований возможны различные технические решения, причем поскольку преемственность систем третьего поколения по отношению к системам сотовой связи второго поколения очевидна, как очевидна и роль сегодняшних компаний-производителей аппаратуры сотовой связи, то преемственными оказываются и предлагаемые технические решения.

Основные варианты на сегодняшний день таковы. Компаниями Nokia (Финляндия), Ericsson (Швеция), Alcatel (Франция) и Siemens (Германия) предложено в качестве базы для основы архитектуры сети использовать платформу GSM. Такова же позиция крупнейшего японского оператора NTT DoCoMo. Альтернативное предложение, не сформулированное пока с такой же степенью четкости, основывается на использовании американского стандарта IS-41 (ANSI-41), определяющего межсистемные операции в сотовой связи.

Для радиоинтерфейса также имеется два предложения. Компанией NTT DoCoMo в сотрудничестве с компаниями Nokia, Ericsson, Motorola (США), Lucent Technologies (США) начата разработка решения на основе широкополосного CDMA (Wideband CDMA – W-CDMA, полоса 5 МГц); к этому решению присоединилась и компания TIM (Telecom Italia Mobile, Италия). Экспериментальную систему в Японии планировалось развернуть к концу 1997 г. и испытать в течение 1998 г. Предполагалось также начать процедуру стандартизации этой системы с участием японского органа по стандартизации Ассоциации радиопромышленности и бизнеса (Association of Radio Industries and Business – ARIB). Компании Alcatel, Italtel (Италия), Siemens, Nortel (Канада), а также Bosch (Германия) и Motorola выступили в поддержку комбинированного решения TDMA/CDMA, в котором в пределах каждого временного

слота обычной структуры эфирного интерфейса TDMA производится дополнительное кодирование информации в соответствии с принципами CDMA при полосе канала 1,6 МГц.

Очередной конкретный шаг к построению систем третьего поколения предпринят в Англии: Департаментом торговли и промышленности (Department of Trade and Industry – DTI) в июле 1997 г. опубликован проект правил лицензирования систем, в соответствии с которым к концу 1998 г. должны быть выданы три лицензии с первоначальным сроком действия 15 лет, с проведением соответствующего аукциона и предоставлением каждому из операторов полосы не менее 2 x 20 МГц. По-видимому, в настоящее время можно считать в достаточной мере общепринятым мнение, что при выделенных полосах частот число операторов систем третьего поколения в одной стране (одном регионе) не может превышать трех. Что же касается величины суммарной полосы частот, то общее мнение также сходится на том, что она должна быть увеличена до 445...580 МГц, причем увеличение требуется как для наземного, так и для спутникового сегментов. В качестве сроков начала эксплуатации систем третьего поколения указываются: в Японии – 2000 г., в Европе – 2002 г., в Америке – 2004 г. Один из прогнозов, принадлежащий организации UMTS Forum, предсказывает, что в 2005 г. сегмент мобильных пользователей мультимедиа в Европе будет составлять 16 % от общей абонентской базы мобильной связи, а объем трафика мультимедиа – 60 % от общего объема трафика мобильной связи.

Конечно, до 2000 г., и тем более до 2002 или до 2005, времени, по теперешним темпам развития событий, еще много и многое успеет измениться. Тем не менее уже сейчас ясно, что указанные сроки реальны, и через три – пять лет мы будем свидетелями появления очередного, качественно нового, поколения мобильной связи. И один из моментов, являющихся залогом успеха, – объединение в работе над системами третьего поколения усилий практически всех ведущих компаний и организаций Европы, Америки и Японии, прецедентов чему не было во всей истории развития средств мобильной связи.

6.3. Сотовая связь и информационные сети

Один из аспектов развития сотовой связи, как, впрочем, и связи в целом, связан с созданием информационных сетей, причем по мере развития граница между сетями связи и информационными сетями становится все более размытой, а сами сети все более гибкими и многофункциональными. Надо сказать, что вообще проблемы современных сетей связи, интеллектуальных сетей, информационных сетей – это самостоятельная большая область, требующая отдельного рассмотрения. Но мы посчитали необходимым затронуть эту тему, выбрав для краткого знакомства, в

значительной мере волевым образом, три вопроса: открытые системы, сети ISDN, сеть Интернет [19, 83, 15, 46, 31, 111, 57 и др.].

Методическую основу современных информационных систем составляет разработанная в 1977 – 1984 гг. модель сетевой архитектуры, известная под названием *базовой эталонной модели* или *основной опорной модели* (*Basic Reference Model*), определяющая принципы *взаимодействия открытых систем* (*Open Systems Interconnection* – OSI) и в 1984 г. закрепленная стандартом Международной организации стандартов (*International Standards Organization* – ISO). Эту модель для краткости называют также моделью ISO/OSI. Термин *открытая* в применении к системе означает, что структура и свойства системы не защищены патентом, т.е. не являются чьей-то собственностью, а доступность полного описания системы позволяет любому пользователю на законных основаниях свободно (бесплатно) использовать ее для собственных нужд. Одним из основных достоинств модели ISO/OSI является рациональная организация области взаимодействия открытых систем, которая строится в виде многоуровневой иерархической структуры, включающей в общем случае семь уровней взаимодействия с четко определенным для каждого из них функциональным назначением. Эти семь уровней таковы (в порядке расположения снизу вверх):

- уровень 1 – *физический* (*physical layer*), обеспечивает передачу информации по каналам связи;
- уровень 2 – *канальный*, или *уровень соединения* (*data-link layer*), управляет работой канала, включая форматирование и защиту информации от искажений на физическом уровне;
- уровень 3 – *сетевой* (*network layer*), определяет путь следования (маршрутизацию) информации по сети, т.е. является своего рода службой доставки информации (в компьютерных сетях – от компьютера к компьютеру);
- уровень 4 – *транспортный* (*transport layer*), обеспечивает доставку информации от одного приложения к другому;
- уровень 5 – *сеансовый* (*session layer*), управляет передачей информации между прикладными процессами, включая обработку имен, паролей и прав доступа при открытии сеанса связи;
- уровень 6 – *уровень представления* (*presentation layer*), представляет передаваемую и принимаемую информацию в нужной форме, т.е. решает задачи преобразования формата файлов и задачи сетевого интерфейса к периферийным устройствам;
- уровень 7 – *прикладной* (*application layer*), обеспечивает работу сетевых приложений, т.е. является интерфейсом с прикладными процессами.

Каждый уровень в этой иерархии взаимодействует с соседними, причем более низкие уровни являются «помощниками» более верхних, принимая на себя выполнение возможно большего числа вспомогательных функций и защищая верхние уровни от

«избыточной» информации. В любой реальной сети взаимодействие уровней реализуется в соответствии с определенным набором конкретных протоколов работы, причем в разных сетях наборы функций различных уровней могут отличаться или некоторые уровни могут даже отсутствовать. Но модель ISO/OSI, подчеркнем еще раз, является хорошо продуманной и рациональной рекомендацией к построению информационных сетей, и именно она лежит в основе построения сетей ISDN и Интернет.

Сети ISDN (*Integrated Services Digital Network*, буквально – *цифровая сеть с интеграцией функций*^{*)}) – это цифровые сети электросвязи, осуществляющие передачу различных видов информации (речи, текста, данных, изображения) через одно и то же соединение. Возможность построения такой единой сети появилась с возникновением и развитием техники цифровой передачи сигналов, которая в настоящее время является не только наиболее перспективной, но уже и основной в технике связи. Целесообразность построения единой цифровой сети определяется тем, что при этом технически объединяются средства передачи и коммутации сигналов для разных видов информации и создаются большая гибкость и большие удобства в реализации всех необходимых функций системы связи. Принципы построения сетей ISDN после широкого обсуждения и согласования были закреплены в виде рекомендаций Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии – МККТТ (*Consultative Committee for International Telegraphy and Telephony – CCITT*), выполняющих фактически роль международных стандартов, и опубликованы в Красной книге в 1985 г.

Связь между сетями ISDN и сотовыми сетями двояка, причем оба момента сильно коррелированы между собой. Во-первых, сотовым сетям приходится взаимодействовать с сетями ISDN, так же как и с сетями PSTN (*Public Switched Telephone Network* – коммутируемая телефонная сеть общего пользования), что требует соответствующего интерфейса, в том числе средств коммутации и протоколов обмена. Во-вторых, по набору услуг и условиям их предоставления сети сотовой связи должны по возможности соответствовать сетям ISDN – наиболее совершенным из современных сетей электросвязи, и эта задача также решается довольно успешно. В частности, сети стандарта GSM иногда образно называют «мобильными ISDN», хотя дотошные оппоненты не без оснований возражают против этого, считая, что в сетях ISDN используются не в пример более широкие полосы и более высокие скорости передачи информации, чем в GSM. С появлением систем мобильной связи третьего поколения и это различие в значительной мере исчезнет.

*) Встречаются и другие варианты перевода, например *цифровая сеть с интеграцией служб* или *цифровая сеть с интегральным обслуживанием*. В соответствии с приведенными нами ранее соображениями о переводе термина *services*, вариант перевода, приведенный выше в основном тексте, представляется наиболее удачным.

Сеть Интернет (Internet) – информационная компьютерная сеть (точнее – совокупность таких сетей), возникшая немногим более 10 лет тому назад на базе информационно-коммуникационных сетей, созданных Министерством обороны США для обеспечения своих нужд. Первоначально Интернет служил для решения образовательных и научных задач, а его пользователями были сотрудники университетов. Но постепенно облик Интернета менялся, круг пользователей расширялся, расширялся и состав решаемых задач, в последние годы все сильнее ощущается коммерциализация Интернета. Рост сети происходил лавинообразно: если в 1985 г. в ней было около двух тысяч компьютеров, то сейчас их несколько десятков миллионов, распределенных по всему миру, и процесс роста продолжается. Существует проект спутникового обеспечения сети Интернет, предусматривающий создание системы из трех сотен специально предназначенных для этого ИСЗ.

Сегодняшний Интернет многолик, и в качестве основных его «ветвей» можно назвать следующие:

- World Wide Web (в буквальном переводе – всемирная паутина), или сокращенно WWW, или даже просто Web, – фактически это глобальная информационно-справочная система на основе гипертекстовых документов, перерастающая в гипермедиа систему с графикой, звуком и видео;
- электронная почта (e-mail);
- возможность получения (перекачки) файлов с нужной информацией, находящихся на удаленных компьютерах (серверах), с помощью инструмента FTP (*File Transfer Protocol*, буквально – протокол передачи файлов);
- конференции (своего рода электронные «доски объявлений») пользователей сети Интернет.

Приведенным перечнем возможности Интернета далеко не исчерпываются. Сеть имеет развитые системы и средства поиска информации. Она предоставляет и другие (кроме e-mail и «досок объявлений») варианты общения между пользователями. В последнее время всерьез рассматривается возможность использования сети Интернет для организации телефонной связи. И конечно, почти безграничны информационные возможности сети – там действительно «можно найти все» или, если говорить точнее, «можно найти хоть что-нибудь практически обо всем».

Если вернуться к интересам сотовой связи, то их отражение в Интернете опять-таки осуществляется по нескольким направлениям. Во-первых, практически все коммерческие компании, включая операторов сотовой связи, имеют в сети Интернет свои WEB-страницы, информирующие о всех основных сторонах их деятельности. Во-вторых, эти WEB-страницы обычно не ограничиваются только предоставлением справочной информации для пассивного изучения ее пользователем, а предусматривают те или иные формы интерактивного взаимодействия, начиная с поиска информации по запросу пользователя и организации обратной

связи (через электронную почту) посетителя WEB-страницы с соответствующей компанией и кончая «электронным магазином», осуществляющим всю организационно-подготовительную работу по обслуживанию абонентов. В-третьих, в число услуг, предоставляемых оператором сотовой связи своим абонентам, все чаще включаются доступ к сети WWW и услуги электронной почты, предоставляемые с мобильных абонентских терминалов, а также специальные «коммуникаторы», представляющих собой своеобразное сочетание мобильного телефона и сверхпортативного переносного компьютера. По-видимому, возможности Интернета в применении к сотовой связи этим не исчерпываются, и их взаимодействие будет продолжать расширяться.

Таким образом, развитие сотовой связи, являющейся одним из передовых направлений отрасли электросвязи в ее современном виде, происходит и в дальнейшем будет происходить в тесной связи с современными информационными сетями, образуя существенный элемент мирового информационного пространства. Очень нагляден в этом отношении пример интерактивного взаимодействия, представленный на форуме «Телеком-Интерактив-97» в Женеве в сентябре 1997 г., когда двое теннисистов с ракетками в руках демонстрировали совместную игру, находясь за много километров друг от друга, для чего использовалась специальная интерактивная система, включающая комплексы датчиков и шлемы с визуализаторами для каждого из игроков, а также компьютеры и линии связи.

6.4. Проблемы и решения

Из предшествующего материала могло сложиться впечатление, что развитие сотовой связи происходит ровно, с полной определенностью и предсказуемостью, без особых трудностей и проблем. На самом деле это совсем не так, проблем более чем достаточно, самых разнообразных – технических, организационных, маркетинговых, и многие из них довольно сложным образом переплетаются между собой. Приведем несколько примеров.

К числу проблем, которые можно считать техническими, следует отнести:

- разработку и внедрение новых кодеков речи, в частности полускоростных и усовершенствованных полноскоростных;
- разработку и внедрение методов передачи данных, в том числе относительно высокоскоростных;
- выбор платформы для систем мобильной связи третьего поколения, включая спутниковый сегмент;
- организацию глобального автоматического роуминга в системах третьего поколения и между системами третьего и второго поколений;

- передачу мультимедиа с соответствующими полосами частот и т.п.

Организационные проблемы включают прежде всего все аспекты координации усилий многочисленных участников индустрии мобильной связи, например в отношении поиска оптимального компромисса между инициативными предложениями отдельных компаний-производителей оборудования и необходимостью высокой степени совместимости и унификации технических решений для систем третьего поколения. Другой пример – не менее сложная проблема распределения электромагнитного спектра, в том числе и для нужд тех же систем третьего поколения. Непосредственная связь всех этих проблем с технической стороной развития мобильной связи совершенно ясна.

Из маркетинговых проблем первоочередной и неизменно актуальной является также совершенно очевидная проблема: что следует развивать в первую очередь, какие услуги нужны и будут пользоваться спросом? Например, будет ли достаточно широко использоваться в мобильной связи передача мультимедиа? Или: нужна ли мобильная связь третьего поколения, если в ней не будет унифицированного роaming глобального масштаба? Еще один пример – из области развития кодеков речи: похоже, что полускоростные кодеки приводят к столь заметному ухудшению качества передачи речи, что они могут не получить такого широкого распространения, на которое можно было рассчитывать еще несколько лет назад, несмотря на обеспечиваемое ими удвоение емкости сети.

Число примеров можно было бы продолжить, но вряд ли это имеет смысл, тем более что завтра неизбежно появятся новые, о существовании которых сегодня мы еще можем и не предполагать. В данном случае дело не в перечне конкретных проблем, а в самом факте, что они существуют и обязательно будут существовать, и для их решения нужны время, силы и квалификация. Но при наличии этих составляющих все проблемы решаемы, и завтрашний день мобильной связи наверняка будет лучше и богаче сегодняшнего.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, основное содержание книги позади, с основами сотовой связи мы познакомились. Теперь самое время подытожить, что же нам удалось рассмотреть и какие из этого можно сделать выводы.

Мы узнали, что сотовая связь возникла действительно совсем недавно, как идея она живет немногим более 25 лет, а как эксплуатируемая коммерчески система связи – около 15 лет. При этом появление сотовой связи было вызвано насущными потребностями самой жизни, она прошла несколько этапов развития, получила широчайшее распространение во всем мире и пока не собирается останавливаться в своем развитии.

Мы познакомились с принципами построения и организацией работы систем сотовой связи, с методами множественного доступа и используемой в цифровых системах обработкой информации, с многолучевым распространением сигналов и возможностями борьбы с ним, с подходом к расчету емкости и проектированию сетей, т.е. со всеми основными техническими проблемами сотовой связи. И хотя эти вопросы изложены достаточно схематично, ясны не только круг вопросов и степень их сложности, но и принципиальные пути решения.

Мы рассмотрели характеристики сотовой связи с позиции пользователя, причем не ограничились перечнем услуг и возможностей абонентского аппарата, но и остановились на таких актуальных вопросах, как биологическая безопасность сотовой связи и обеспечение конфиденциальности.

Мы перечислили другие системы подвижной связи и в первом приближении познакомились с ними, что позволяет нам достаточно обоснованно сопоставлять сотовую связь, например, с пейджингом или говорить о перспективах интеграции сотовой связи и мобильной спутниковой связи.

Теперь мы знаем, каково состояние сотовой связи сегодня и в мире в целом, и в России в частности, знаем характеристики основных аналоговых и цифровых стандартов и занимаемые ими доли рынка, знаем, с какой скоростью аналоговые системы вытесняются цифровыми.

Наконец мы рискнули заглянуть в завтрашний день, познакомились с прогнозами роста сотовой связи, с понятиями персональной связи, третьего поколения мобильной связи и информа-

ционных сетей, убедившись, что дальнейшее развитие сотовой связи также не будет простым и потребует решения множества разнородных проблем.

Таким образом, мы знакомы теперь со всем тем, с чем ставили себе задачу познакомиться, и в зависимости от своих планов и потребностей можем либо просто с удовлетворением констатировать расширение кругозора, либо пытаться так или иначе использовать полученную информацию в своей деятельности в области сотовой связи, либо более сознательно и целеустремленно выступать в той же самой сотовой связи в качестве пользователя.

Мы предвидим вопрос «на засыпку», сопровождаемый скептической улыбкой: а нужна ли такая книга сегодня в России? Ведь рынок сотовой связи у нас пока так мал, сотовая связь настолько элитарна... Все это так, но и логические рассуждения, и здравый смысл, и имеющийся опыт показывают, что все новые вещи и услуги поначалу элитарны, а сотовая связь, развивающаяся сначала медленно, потом очень быстро, лавинообразно, набирает темп и выходит на широкий, а затем и на массовый рынок. И в России сотовая связь также неизбежно станет массовой, для этого нужно только два фактора: время и улучшение общей экономической ситуации в стране. И такая книга, мы уверены, нужна именно сегодня, если не вчера. Надо хоть немного упреждать события, нельзя же до бесконечности жить только сегодняшним днем или, еще того хуже, – вчерашним! Мы рассчитываем, что эта книга будет нашим посильным вкладом в развитие сотовой связи в России.

Приложение
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

АДИКМ	Адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция
Аутентификация	Процедура подтверждения подлинности абонента системы сотовой связи
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь (преобразователь сигналов из аналоговой формы в цифровую)
Идентификация	Процедура отождествления подвижной станции (абонентского терминала)
ИКМ	Импульсно-кодовая модуляция
Логический канал	Определяется видом (составом) информации, передаваемой в физическом канале; в физическом канале может быть реализован один из двух видов логических каналов – канал трафика или канал управления
МККТТ	Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии (ССПТ)
НЧ	Низкая частота; низкочастотный
Обратный канал	Канал передачи информации от подвижной станции к базовой
Прямой канал	Канал передачи информации от базовой станции к подвижной
Ромер	Абонент, использующий услуги роминга
Роминг	Процедура предоставления услуг мобильной связи абоненту одного оператора
СВЧ	Сверхвысокая частота; сверхвысокочастотный
Трафик	Совокупность сообщений, передаваемых по линии связи, или совокупность требований абонентов, обслуживаемых сетью связи
Физический канал	В системе связи с множественным доступом на основе временного разделения каналов (TDMA) – временной слот с определенным номером (или определенная группа

	слотов), предназначенный (предназначенные) для передачи сообщений одного информационного канала; в системе связи с множественным доступом на основе частотного разделения каналов (FDMA) физический канал совпадает с частотным каналом
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь (преобразователь сигналов из цифровой формы в аналоговую)
Частотный канал	Полоса частот, отводимая для передачи информации одного канала связи
AC	Authentication center – центр аутентификации
ACA	Adaptive channel allocation – адаптивное распределение каналов
AIN	Advanced Intelligent Network – усовершенствованная интеллектуальная сеть
AMPS	Advanced Mobile Phone Service – усовершенствованная мобильная телефонная служба (стандарт сотовой связи)
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service – спутниковая система мобильной аэронавигации
ANSI	American National Standards Institute – Американский национальный институт стандартов (США)
ARIB	Association of Radio Industries and Business – Ассоциация радиопромышленности и бизнеса (Япония)
ARQ	Automatic repeat request – перезапрос (запрос автоматического повторения)
BCCH	Broadcast control channel – вещательный канал управления
BCH	Bose-Chaudhuri-Hocquenghem code – код Боуза-Чоудхури-Хоквингема
BER	Bit error rate – частота битовой ошибки
BPSK	Binary phase shift keying – двоичная (бинарная) фазовая манипуляция
BSIC	Base station identity code – код идентификатора базовой станции

Call barring	Запрет вызова
Call divert	Переадресация вызова (то же самое, что и <i>call forwarding</i>)
Call forwarding	Переадресация вызова (то же самое, что и <i>call divert</i>)
Call hold	Удержание вызова (сохранение вызова)
Call waiting	Ожидание вызова
Carrier	Компания-оператор сотовой связи
CCH	Control channel – канал управления
CCITT	Consultative Committee for International Telegraphy and Telephony – Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии (МККТТ)
CDMA	Code division multiple access – множественный доступ с кодовым разделением
CDVCC	Coded digital verification color code – кодированный цифровой код окраски
Cell	Сота, ячейка
Cell site	Позиция ячейки, или позиция соты, – совокупность базовых станций, установленных в одном месте; часто употребляется как синоним базовой станции
Cellular	Сотовый, ячеечный
CELP	Code-excited linear prediction – линейное предсказание с кодовым возбуждением
CEPT	Conference Europeenne des Administrations des Postes et des Telecommunications – Европейская конференция администраций почт и электросвязи
C/I	Carrier-to-interference ratio – отношение несущая/помеха
Clearinghouse	Расчетный центр
Closed user group	Закрытая группа пользователей
Conference call	Конференц-связь (то же самое, что и <i>multi-party call</i>)
CRC	Cyclic redundancy check – циклический контроль избыточности
DAM	Diagnostic acceptability measure – диагностическая мера приемлемости

D-AMPS	Digital AMPS – цифровой AMPS (стандарт сотовой связи)
DBS	Direct Broadcast Satellite – ИСЗ прямого вещания
DCS	Digital Cellular System – цифровая система сотовой связи
DECT	Digital European Cordless Telecommunications – Цифровая европейская беспроводная электросвязь (стандарт беспроводного телефона)
DRT	Diagnostic rhyme test – диагностический рифмованный тест
DTI	Department of Trade and Industry- Департамент торговли и промышленности (Англия)
EIR	Equipment Identity Register – регистр аппаратуры (регистр идентификации аппаратуры)
E-mail	Электронная почта сети Интернет
ESN	Electronic serial number – электронный серийный номер
ETSI	European Telecommunications Standards Institute – Европейский институт стандартов электросвязи
FACCH	Fast associated control channel – быстрый совмещенный канал управления
FCC	Federal Communications Commission – Федеральная комиссия связи (США)
FDD	Frequency division duplex – дуплексное разделение по частоте
FDMA	Frequency division multiple access – множественный доступ с разделением по частоте
FH	Frequency hopping – скачки по частоте
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunications System – Наземная система мобильной общественной электросвязи будущего
FSK	Frequency shift keying – частотная манипуляция
FSS	Fixed Satellite Service – стационарная (фиксированная) система спутниковой связи
FTP	File transfer protocol – протокол передачи файлов сети Интернет

GEO	Geostationary Earth Orbit – геостационарная околоземная орбита
GMSK	Gaussian minimum shift keying – гауссовская манипуляция с минимальным сдвигом
GMPCS	Global Mobile Personal Communications by Satellite – Глобальная спутниковая система персональной мобильной связи
GPS	Global Positioning System – Глобальная система определения местоположения (спутниковая навигационная и геодезическая система)
GSM	Global System for Mobile Communications – Глобальная система мобильной связи (стандарт сотовой связи)
GSM MoU Association	Ассоциация GSM MoU – международная Ассоциация операторов стандарта GSM
Handheld	Ручной абонентский терминал
Handoff	Передача обслуживания (американский термин; то же самое, что и <i>handover</i>)
Handover	Передача обслуживания (англо-европейский термин; то же самое, что и <i>handoff</i>)
HEO	Highly Elliptical Orbit – высокоэллиптическая орбита
HLR	Home location register – домашний регистр (база данных, содержащая сведения об абонентах, зарегистрированных в данной системе)
ICO	Intermediate Circular Orbit – промежуточная круговая орбита
IMEI	International mobile equipment identity – международный идентификатор аппаратуры мобильной связи
IMSI	International mobile subscriber identity – международный идентификатор абонента мобильной связи
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000 (after the year 2000) – Международная система мобильной электросвязи-2000 (после 2000 г.)
IN	Intelligent network (intellectual network) – интеллектуальная сеть
ISDN	Integrated services digital network – цифровая сеть с интеграцией функций

ISO	International Standards Organization – Международная организация стандартов
ITU	International Telecommunications Union – Международный союз электросвязи
LEO	Low earth orbit – низкая околоземная орбита
LPC	Linear predictive coding – кодирование (речи) на основе метода линейного предсказания
LTP	Long term prediction – долговременное предсказание
MAHO	Mobile assisted handoff (handover) – передача обслуживания с участием подвижной станции
MEO	Medium earth orbit – промежуточная околоземная орбита
Mobile (station)	Подвижная станция (абонентский терминал)
MOS	Mean opinion score – средняя субъективная оценка (средняя оценка мнений)
MoU	Memorandum of understanding – меморандум взаимопонимания
MPE-LTP	Multi-pulse excited long term predictor – линейное предсказание с многоимпульсным возбуждением и долговременным предсказателем
MSK	Minimum shift keying – минимальная манипуляция (манипуляция с минимальным сдвигом)
MSS	Mobile satellite service – мобильная спутниковая система
MTSO	Mobile telephone switching office – центр коммутации (обычно в применении к аналоговым системам сотовой связи)
Multiparty call	Коференц-связь (то же самое, что и <i>conference call</i>)
NMT	Nordic mobile telephone – мобильный телефон северных стран (стандарт сотовой связи)
OMC	Operation and maintenance centre – центр управления и эксплуатации
OQPSK	Offset quadrature phase shift keying – квадратурная фазовая манипуляция со смещением

OSI	Open systems interconnection – взаимодействие открытых систем
QPSK	Quadrature phase shift keying – квадратурная фазовая манипуляция
PBX	Private branch exchange – офисный коммутатор, офисная АТС
PCN	Personal communications network – сеть персональной связи
PCS	Personal communications systems – системы персональной связи
PCSS	Personal communications satellite services – услуги (функции) спутниковой персональной связи
Penetration	Проникновение – доля населения, пользующаяся сотовой связью (обычно выражается в процентах)
PIN	Personal identification number – персональный идентификатор (абонента сотовой связи)
PHS	Personal Handyphone System – Система персонального ручного телефона (японская система беспроводной связи)
Portable	Портативный абонентский терминал
PSTN	Public switched telephone network – коммутируемая телефонная сеть общего пользования
PUK	Personal unblocking key – персональный ключ разблокировки
RACH	Random access channel – канал случайного доступа
RCR	Research & Development Center for Radio Systems – Центр исследования и развития радиосистем (Япония)
REL P	Regular excited linear prediction – линейное предсказание с возбуждением регулярной последовательностью импульсов
RPE-LTP	Regular pulse excited long term predictor – линейное предсказание с возбуждением регулярной последовательностью импульсов и долговременным предсказателем
SACCH	Slow associated control channel – медленный совмещенный канал управления

SAR	Specific absorption rate – коэффициент удельного поглощения
SIM	Subscriber identity module – модуль идентификации абонента (SIM-карта, или смарт-карта)
SINAD	Signal to noise plus distortion (ratio) – отношение сигнала к сумме шума и продуктов искажений
SIS	Subscriber identity security – безопасность идентификатора абонента
SMS	Short message service – функция (услуга) передачи коротких сообщений
SPACH	SMS, paging and access response channel – канал передачи коротких сообщений, вызова и ответа на вызов
Spread spectrum (system)	Система с расширением спектра (с расширенным спектром)
STP	Short term prediction – кратковременное предсказание
Switch	Коммутатор (центр коммутации)
TACS	Total Access Communications System – Общедоступная система связи (стандарт сотовой связи)
TCH	Traffic channel – канал трафика
TDD	Time division duplex – дуплексное разделение во времени
TDMA	Time division multiple access – множественный доступ с разделением по времени
TETRA	Trans European Trunked Radio – Общеввропейская система транковой связи (стандарт транковой связи)
TMSI	Temporary mobile subscriber identity – временный идентификатор абонента мобильной связи
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System – Универсальная система мобильной электросвязи
VAD	Voice activity detector – детектор речевой активности

VLR	Visitor location register – гостевой регистр (база данных, содержащая сведения об абонентах-ромерах)
VSELP	Vector sum excited linear prediction – линейное предсказание с возбуждением векторной суммой
WARC	World Administrative Radio Conference – Всемирная административная конференция по радиочастотам
WIN	Wireless Intellectual Network – беспроводная интеллектуальная сеть
WRC	World Radio Conference – Всемирная радиоконференция
WWW	World Wide Web – Всемирная паутина – гипертекстовая информационно-справочная система (служба) сети Интернет
$\pi/4$ DQPSK	$\pi/4$ differential quadrature phase shift keying – дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом $\pi/4$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авдеев С. М., Милашевский И. А., Ратынский М. В.** Стандарт DCS-1800 в мире и в России: шаг к персональной связи // Мобильные системы. – 1997. – № 1. – С. 15 – 18.
2. **Авдеева Л. В.** Подвижная связь в России // Электросвязь. – 1996. – № 7. – С. 26, 27.
3. **Авдеева Л. В.** Сети персонального радиовызова: концепция и прогресс // Мир связи и информации: Connect! – 1997. – № 5. – С. 30 – 32.
4. **Авдеева Л. В., Антонян А. Б., Вронец А. П., Юрасов Л. В.** Основные положения Генеральной схемы создания и развития сетей СПС-450 и СПС-900 // Мобильные системы. – 1996. – № 2. – С. 6 – 15 (Вестник связи – 1996. – № 11).
5. **Айзин Ф., Ратынский М.** Цифровой стандарт сотовой связи D-AMPS в России // Мир связи. – 1996. – № 4. – С. 26 – 28, 30.
6. **Алябьев С. И.** Ассоциация операторов федеральной сотовой сети NMT-450 // Мобильные системы. – 1996. – № 3. – С. 31 – 38.
7. **Аносов А. М., Герасимов В. В., Колосов А. В.** и др. Персональная спутниковая связь // Технологии электронных коммуникаций, том 64. М. 1996.

8. **Афанасьев В. В.** Ассоциация GSM – координатор деятельности операторов // Мобильные системы. – 1997. – № 1. – С. 25 – 29.
9. **Бакурский В. А., Гуськов Г. Я., Сетдинов Р. А.** и др. Система спутниковой связи «Сокол» // Электросвязь. – 1995. – № 4. – С. 8 – 11.
10. **Банкет В. Л., Дорофеев В. М.** Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1988.
11. **Бахтиаров Г. Д., Малинин В. В., Школин В. П.** Аналого-цифровые преобразователи. – М.: Сов. радио, 1980.
12. **Беллами Дж.** Цифровая телефония. – М.: Радио и связь, 1986.
13. **Белянко Е., Фрэнз И.** Региональные сети подвижной радиосвязи переходного периода // Вестник связи. – 1995. – № 9. – С. 23 – 26.
14. **Блейхут Р.** Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986.
15. **Боккер П.** ISDN – цифровая сеть с интеграцией служб. Понятия, методы, системы. – М.: Радио и связь, 1991.
16. **Бородич С. В.** О применении систем спутниковой связи со спутниками на низких орбитах // Электросвязь. – 1995. – № 9. – С. 19 – 24.
17. **Быховский М. А.** Сравнение различных систем сотовой подвижной связи по эффективности использования радиочастотного спектра // Электросвязь. – 1996. – № 5. – С. 9 – 12.
18. **Варакин Л. Е.** Теория сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1970.
19. **Варакин Л. Е.** Интеллектуальная сеть. Ч. 1. Эволюция сетей и услуг связи // Сети. – 1991. – № 6.
20. **Варакин Л. Е.** Концепция создания широкополосных систем подвижной и персональной радиосвязи // Вестник связи. – 1994. – № 9. – С. 16 – 19.
21. **Варакин Л. Е., Кучерявый А. Е., Соколов Н. А., Филюшин Ю. И.** Интеллектуальная сеть. Ч. 2. Концепция и архитектуры // Сети. – 1992. – № 1. – С. 6 – 10.
22. **Ворсано Д.** Кодирование речи в цифровой телефонии // Сети и системы связи. – 1996. – № 1. – С. 84 – 87.
23. **Генеральные схемы сотовой связи** // Вестник связи. – 1996. – № 7. – С. 15.
24. **Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н.** Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1990.
25. **Гриднева Н., Герусова Е., Лубнин К.** Удар ниже пейджера // Деньги. – 1996. – № 23 (83). – С. 32 – 38.
26. **Громаков Ю. А.** Сотовые системы подвижной радиосвязи. 1994.
27. **Громаков Ю. А.** Стандарты и системы подвижной радиосвязи. М. Мобильные ТелеСистемы – Эко-трендз. 1997.
28. **Громов В.** МРТ 1327 или TETRA: что выбрать? // Мобильные системы. – 1997. – № 3. – С. 17.
29. **Гугалов К. Г., Любомудров Д. Ю.** Новые возможности транкинговой связи // Вестник связи. – 1996. – № 1. – С. 27 – 28.

30. **Гуськов Г. Я., Рыбальченко Ю. М., Соломонов Ю. М.** Низкоорбитальная система спутниковой связи «Курьер» // Электросвязь. – 1995. – № 4. – С. 15 – 16.
31. **Джамса К., Коуп К.** Программирование для Internet в среде Windows. – СПб.: Питер, 1996.
32. **Долуханов М. П.** Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1965.
33. **Евсиков М.** Грядущая революция в спутниковой связи // Компьютер-пресс. – 1996. – № 9. – С. 150 – 154; № 10. – С. 124 – 128.
34. **Емельянов Ю. И.** Сертификация технических средств и услуг связи в условиях российского рынка // Электросвязь. – 1996. – № 6. – С. 7 – 8.
35. **Жельников В.** Криптография от папируса до компьютера. – М.: АВФ, 1996.
36. **Заседание Совета директоров Ассоциации российских операторов сетей GSM** // Мобильные системы. – 1997. – № 6. – С. 49.
37. **Зелевич Е. П.** Будущее пейджинга // Вестник связи. – 1996. – № 6. – С. 24 – 27.
38. **Зимин Д. Б., Ратынский М. В., Вайсман Ю. И.** Сотовый радиотелефон в бизнесе и в быту. – М., 1996.
39. **«Интерспутник»: хроника деятельности** // Электросвязь. – 1995. – № 4. – С. 22.
40. **Киян А. И.** Транкинговые системы радиосвязи MPT 1327 в России // Мобильные системы. – 1997. – № 2. – С. 51 – 53.
41. **Кларк Дж., Кейн Дж.** Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи. – М.: Радио и связь, 1987.
42. **Концепция использования в России транкинговых систем при организации коммерческих сетей связи** // Вестник связи. – 1995. – № 9. – С. 29 – 31.
43. **Коротаев Г. А.** Методы линейного предсказания // Зарубежная радиоэлектроника. – 1980. – № 10. – С. 49 – 65.
44. **Коротаев Г. А.** Анализ и синтез речевого сигнала методом линейного предсказания // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – № 3. – С. 31 – 51.
45. **Коротаев Г. А.** Некоторые аспекты линейного предсказания при анализе и синтезе речевого сигнала // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – № 7. – С. 3 – 31.
46. **Крол Э.** Все об Internet. – Киев.: ВНУ, 1995.
47. **Крупнейший оператор спутниковой связи России** // Телекоммуникации и информатика. – 1995. – № 7 – 8. – С. 44 – 45.
48. **Крупнов А. Е.** Отрасль связи в 1996 – 1997 гг.: итоги, планы, прогнозы // Мобильные системы. – 1997. – № 4. – С. 2 – 6.
49. **Крылов В.** С телефоном по городу, или что такое сотовые системы связи. – Н. Новгород: ДЕКОМ, 1994.
50. **Ли У. К.** Техника подвижных систем связи. – М.: Радио и связь, 1985.
51. **Липкин И. А.** Основы статистической радиотехники, теории информации и кодирования. – М.: Сов. радио, 1978.

52. **Лисин А. В., Несвит Н. Н.** Спутниковая радиосвязь // Электросвязь. – 1995. – № 1. – С. 20 – 24.
53. **Маркел Дж. Д., Грэй А. Х.** Линейное предсказание речи. – М.: Связь, 1980.
54. **Матвеев И. П.** Сотовая связь: сегодня и завтра. – М., 1994.
55. **Моудер Дж., Элмаграби С.** (ред.). Исследование операций. Т. 1. Методологические основы и математические методы. – М.: Мир, 1981.
56. **Невдяев Л. М., Тамаркин В. М., Сергеев С. И.** Системы подвижной связи. – М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1995.
57. **Николаев И. В.** По итогам Международного форума «Телеком – Интерактив – 97» // Мобильные системы. – 1997, сентябрь – октябрь. – № 5. – С. 28 – 30.
58. **Оситис А.** Прощай, «Алтай»! // Мир связи и информации: Соппест! – 1996. – № 1. – С. 8 – 9.
59. **Павлов В. Г.** Ассоциация-800 – союз стремительных и находчивых // Мобильные системы. – 1997. – № 1. – С. 30 – 34.
60. **Персональная система портативных телефонов** // Мир связи. – 1996. – № 3. – С. 48 – 50.
61. **Принципы развития сетей подвижной связи** // Вестник связи. – 1996. – № 9. – С. 7.
62. **Проблемы электромагнитной безопасности человека.** Фундаментальные и прикладные исследования. 28 – 29 ноября 1996 г. Москва // Тез. Докл. конференции.
63. **Рабинер Л., Гоулд Б.** Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978.
64. **Рабинер Л. Р., Шафер Р. В.** Цифровая обработка речевых сигналов. – М.: Радио и связь, 1981.
65. **Райнер М. М.** Опасно ли высокочастотное излучение сотовых радиотелефонов? // Обзор. Би Лайн Экспресс. – 1996. – № 10.
66. **Райнер М. М.** Нормативные документы по безопасности сотовой связи (российские и зарубежные). // Обзор. Би Лайн Экспресс. – 1997. – № 1 (13).
67. **Ратынский М. В.** Сотовая связь как система массового обслуживания // Мобильные системы. – 1997, март – апрель. – № 2. – С. 16 – 18.
68. **Ратынский М. В.** России нужны сильные отечественные операторские компании! // Мобильные системы. – 1997, май – июнь. – № 3. – С. 8 – 11.
69. **Ратынский М. В.** Сотовая связь в Японии // Мобильные системы. – 1997, ноябрь – декабрь. – № 6.
70. **Розенберг В. Я., Прохоров А. И.** Что такое теория массового обслуживания. – М.: Сов. радио, 1965.
71. **Румянцев М. В.** Пейджинговые системы // Мобильные системы. – 1997. – № 2. – С. 47 – 49.
72. **Савин А.** По сотовому телефону можно договориться до лимфомы // Известия. – 1997. – 17 мая.

73. **Семенихин В. С., Пышкин И. М.** (ред.). Сухопутная подвижная радиосвязь. Кн. 1. Основы теории. – М.: Радио и связь, 1990.
74. **Ситняковский И. В., Мейкшан В. И., Маглицкий Б. Н.** Цифровая сельская связь. – М.: Радио и связь, 1994.
75. **Соколов В. В., Филимонов Е. Б., Пыльцов В. А.** Низкоорбитальная спутниковая система связи «Паллада» // Радиотехника. – 1995. – № 6. – С. 3 – 8.
76. **Стуруа М.** Осторожно: сотовый телефон! // Московский комсомолец. – 1997. 3 июня.
77. **Тамаркин В. М., Невдяеа Л. М., Сергеев С. И.** Низкоорбитальные системы спутниковой связи. – М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1995.
78. **Тамаркин В. М., Невдяев Л. М., Сергеев С. И., Зайцев А. Н.** Транкинговые системы радиосвязи. – М.: ЦНТИ «Информсвязь», 1996.
79. **Хоникат Д.** Internet. Windows 95. – М.: Бином, 1996.
80. **Хорошилов В. А.** Транкинговые системы связи – особенности внедрения и перспективы развития // Мобильные системы. – 1997. – № 3. – С. 37 – 38.
81. **Чачин П.** Мобильные телекоммуникации в России // PC Week/RE. – 1997, 18 ноября. – № 45. – С. 39.
82. **Шишло А.** Пейджеры // Мир связи и информации: Connect! – 1996. – № 1. – С. 44 – 46.
83. **Якубайтис Э. А.** Открытые информационные сети. – М.: Радио и связь, 1991.
84. **Abrishamkar F., Siveski Z.** PCS global mobile satellites // IEEE Communications Magazine. – 1996. – Vol. 34, No. 9. – P. 132 – 136.
85. **ANSI/EIA/TIA-553. Mobile station – land station compatibility specification.** 1990.
86. **ANSI/IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz.** ANSI/IEEE C95.1 – 1992.
87. **Bjornland D. F., Lauritzen G. O.** UMTS – the universal mobile telecommunications system // Telektronikk. – 1995. – Vol. 91, No. 4. – P. 123 – 132.
88. **Boucher N. J.** The cellular radio handbook. A reference for cellular system operation. Quantum Publishing. 3rd ed. 1995.
89. **Boucher N. J.** The paging technology handbook. Quantum Publishing. 2nd ed. 1995.
90. **Callendar M. H.** International Mobile Telecommunications – 2000 standards efforts of the ITU // IEEE Personal Communications. – 1997, August. – Vol. 4, No. 4. – P. 6 – 7.
91. **Can Scandinavia make the leap from 1-in-3 to 1-in-2?** // Global Mobile. – 1997, August 21. – Vol. 4, No. 16. – P. 12.
92. **Chauning I.** All bets off for third generation mobile system? // Mobile Communications International. – 1997, October. – No. 45. – P. 39 – 42.
93. **Cochetti R.** Mobile satellite communications handbook. Quantum Publishing. 1995.

94. **Combating cellular fraud.** June 26 & 27, 1995. Chicago, Ill. Conference Proceedings.
95. **Crove D.** Third-generation wireless. // Cellular Business. – 1997, October. – Vol. 14, No. 10. – P. 46, 48.
96. **DeMarca J. R. B.** An LSF quantizer for the North-american half-rate speech coder // IEEE Trans. Veh. Technol. – 1994. – Vol. 43, No. 3, Pt. 1. – P. 413 – 419.
97. **EIA/TIA Interim Standard IS-19-B.** Recommended minimum standards for 800 MHz cellular subscriber units. 1988.
98. **EIA/TIA Interim Standard IS-20-A.** Recommended minimum standards for 800 MHz cellular land stations. 1986.
99. **EIA/TIA Interim Standard IS-41-A.** Cellular radiotelecommunications intersystem operations. Febr. 1990.
100. **EIA/TIA Interim Standard IS-54,** Rev. B. Cellular system dual-mode mobile station – base station compatibility standard. April 1992.
101. **EIA/TIA Interim Standard IS-55.** Recommended minimum performance standards for 800 MHz dual mode mobile stations. 1991.
102. **EIA/TIA Interim Standard IS-56.** Recommended minimum performance standards for 800 MHz base stations supporting dual mode mobile stations. 1991.
103. **EIA/TIA Interim Standard IS-136.1.** 800 MHz TDMA Cellular. Radio interface – mobile station – base station compatibility. Digital control channel. 1994.
104. **EIA/TIA Interim Standard IS-136.2.** 800 MHz TDMA Cellular. Radio interface – mobile station – base station compatibility. Traffic channel and FSK control channel. 1994.
105. **EIA/TIA Interim Standard IS-137.** 800 MHz TDMA Cellular. Radio interface – minimum performance standards for mobile stations. 1994.
106. **EIA/TIA Interim Standard IS-138.** 800 MHz TDMA Cellular. Radio interface – base station minimum performance specification. 1994.
107. **ERICSSON-GE Mobile Communications Inc.** Electromagnetic absorption in the human head and neck for Ericsson-GE cellular telephones. Final technical report. 1993.
108. **Eskedal B. E.** The DECT system // *Elektronikk*. – 1995. – Vol. 91, No. 4. – P. 25 – 29.
109. **ETSI.** GSM Technical specifications. 1991.
110. **EU set for 90 million-plus cellular subscribers by end-2000** // *Mobile Communications*. – 1997, October 16. – No. 227. – P. 8 – 9.
111. **Evagora A.** IP voice seeks a pitch. // *tele.com*. – 1997, November. – Vol. 2, No. 12. – P. 35 – 38.
112. **Fraud losses rise, carriers lack external testing of weakness** // *Mobile phone news*. – 1997. – Vol. 15, No. 13. – P. 1.
113. **Gandhi O. P.** Electromagnetic absorption in the human head and neck for Ericsson-GE cellular telephones. Final technical report. University of Utah. 1993.
114. **Gardiner J., West B.** (Ed.). *Personal communication systems and technologies*. Artech House. Boston – London. 1995.

115. **Gibson J. D.** (Ed.). The mobile communications handbook. CRC Press – IEEE Press. 1996.
116. **Gilhousen K. S., Jacobs I. M., Padovani R.** Et al. On the capacity of a cellular CDMA system // IEEE Trans. Veh. Technol. – 1991. – Vol. 40, No. 2. – P. 303 – 311.
117. **Globalstar slashes prices** // Global Mobile. – 1997, December¹. – Vol. 4, No. 23. – P. 10.
118. **Grimstveit L., Myhre H.** The history of mobile communications in Norway // Teletronikk. – 1995. – Vol. 91, No. 4. – P. 15 – 20.
119. **GSM set to break quarter-billion barrier in six years time** // Mobile Communications. – 1997, May 29. – No. 218. – P. 11 – 12.
120. **Hadden A. D.** Personal communications networks. Practical implementations. Artech House. Boston – London. 1995.
121. **Hansen H. B., Mikkelsen K. B., Nielsen H.** Speech and channel coding for the half-rate channel of the GSM system // Teleteknik. Eng. Ed. – 1994. – Vol. 38, No. 2. – P. 101 – 109.
122. **Harte L.** Dual mode cellular. Steiner Publishing Co. 1995.
123. **Helme S.** Eighteen more months before GMPCS takes to the skies // Mobile Communications International. – 1996, December / 1997, January. – No. 37. – P. 47 – 51.
124. **In the market. News line** // Global Telecoms Business. – 1997, February/March. – No. 20. – P. 6.
125. **Interim Standard IS-95-A.** Mobile station – base station compatibility standard for dual-mode wideband spread spectrum cellular system 1995.
126. **Isaksson M., Diachina J., Raith K., Sammarco A.** A new standard for North American digital cellular // Ericsson Review. – 1994. – No. 2.
127. **Isbell R.V.** World report '95 // Cellular Business. – 1995, April. – Vol. 12, No. 4. – P. 30 – 49.
128. **Jager J., Osterberg H.** Using DECT for radio in the local loop // Ericsson Review. – 1995. – No. 3. – P. 111 – 117.
129. **Johannessen A. B., Skaland S. R.** Satellite based mobile communication – today and in the future // Teletronikk. – 1995. – Vol. 91, No. 4. – P. 30 – 37.
130. **Johnson M.** The cause and effect of telecoms fraud // Telecommunications. – 1996. – Vol. 30, No. 12. – P. 80 – 84.
131. **Kestens J.** Considerations for human exposure to electromagnetic fields from mobile telecommunication equipment in the frequency range 30 MHz – 6 GHz (Standardisation in Europe). // Conf. Proc.: «Mobile phones – is there a health risk?» November 14 – 15, 1996. London.
132. **Kuster N.** Thermal effects of electromagnetic fields. Conf. Proc.: «Mobile phones – is there a health risk?» November 14 – 15, 1996. London.
133. **Lee W. C. Y.** Mobile cellular-telecommunications systems. McGraw Hill Co. New York. 1989.
134. **Lee W. C. Y.** Overview of cellular CDMA // IEEE Trans. Veh. Technol. – 1991. – Vol. 40, No. 2. – P. 291 – 302.
135. **Lin J. C.** Health effects of radio frequency radiation from wireless communication technology. // Conf. Proc.: «Mobile phones – is there a health risk?» November 14 – 15, 1996. London.

136. **Lusa J. M.** Paying the price // *PCS Focus*. – 97/98. – P. 65 – 67.
137. **Macandrew A.** **DTI sets the pace for Europe's third-generation mobile system** // *Mobile Communications*. – 1997, August 7. – No. 223. – P. 1, 12, 14 – 15.
138. **Macandrew A.** ITU set to adopt model for third-generation mobile system // *Mobile Communications*. – 1997, October 16. – No. 227. – P. 1 – 3.
139. **Mehrotra A.** Cellular radio. Analog and digital systems. Artech House. Boston – London. 1994.
140. **Mehrotra A.** Cellular radio performance engineering. Artech House. Boston – London. 1994.
141. **Mobile phones – is there a health risk?** November 14 & 15, 1996. London. Conference Proceedings.
142. **Mobile satellite operator resets its sights to keep one step ahead** // *Global Mobile*. – 1997, October 16. – Vol. 4, No. 20. – P. 6 – 7.
143. **Mouly M.** Pautet M.-B. The GSM system for mobile communications. Cell & Sys. 1992.
144. **Mullins S.** Cellular success, made in Scandinavia // *Telecommunications*. – 1997, October. – Vol. 31, No. 10. – P. 34 – 40, 94.
145. **Nokia adds EFR vocoder to IS-136 handsets** // *PCS Week*. – 1997, October 15. – Vol. 8, No. 42. – P. 5.
146. **NTT DoCoMo chooses GSM for third generation** // *Global Mobile*. – 1997, October 2. – Vol. 4, No. 19. – P. 1 – 2.
147. **Number of countries with cellular systems, 1979 – 1997** // *Mobile Communications International*. – 1997, July/August. – No. 43. – P. 67.
148. **Padgett J. E., Gunther C. G., Hattori T.** Overview of wireless personal communications // *IEEE Communications Magazine*. – 1995. – Vol. 33, No. 1. – P. 28 – 41.
149. **Petersen R. C.** Standardization in the United States. // *Conf. Proc.: «Mobile phones – is there a health risk?»* November 14 – 15, 1996. London.
150. **PHS gets off to ringing start** // *Journal of Japanese Trade & Industry*. – 1995. – Vol. 14, No. 5. – P. 4 – 5.
151. **Pickholtz R. L., Milstein L. B., Schilling D. L.** Spread spectrum for mobile communications // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 1991. – Vol. 40, No. 2. – P. 313 – 321.
152. **Proakis J. G.** Adaptive equalization for TDMA digital mobile radio // *IEEE Trans. Veh. Technol.* – 1991. – Vol. 40, No. 2. – P. 333 – 341.
153. **Proakis J. G.** Digital communications. McGraw Hill. New York. 1995. 3rd ed.
154. **Putnam S. W.** Public perception and cellular telephones. // *Conf. Proc.: «Mobile phones – is there a health risk?»* November 14 – 15, 1996. London.
155. **QUALCOMM Inc.** An overview of the application of code division multiple access (CDMA) to digital cellular systems and personal cellular networks. Doc. EX60 – 10010. 1992.
156. **Redl S. M., Weber M. K., Oliphant M. W.** An introduction to GSM. Artech House. Boston – London. 1995.

157. **Reeves B.** Subscription fraud: the original wireless fraud // Cellular Business. - 1996. - Sept. - P. 26 - 30.
158. **Saunders R.** Big brother is listening // Satellite Communications. - 1995. - July. - P. 18.
159. **Scandinavian mobiles to double** // Telecommunications. - 1997, September. - Vol. 31, No. 9. - P. 34.
160. **SmarTone first with EFR codec** // Mobile Communications International. - 1997, November. - No. 46. - P. 17.
161. **Sorbara D., Visintin M.** Performance comparison of GMSK and $\pi/4$ -DQPSK modulations in a mobile radio environment // CSELT Techn. Repts. - 1994. - Vol. 22, No. 4. - P. 447 - 459.
162. **Steele R.** (Ed.). Mobile radio communications. London: Pentech Press Publishers, 1994.
163. **Stearnagel R. A.** Cellular marketing. Quantum Publishing, 1993.
164. **Stuchly M. A.** Mobile communication systems and biological effects on their users // Radio Science Bulletin. - 1995. - No. 275. - P. 7 - 13.
165. **Suzuki T. et al.** Personal handyphone system // Hitachi Review. - 1995. - Vol. 44, No. 4. - P. 241 - 246.
166. **Third generation competition gets hotter** // Mobile Phone Monitor. - 1997, November 3. - Vol. 3, No. 11. - P. 1 - 2.
167. **Top 20 telecommunications equipment manufacturers by 1995 revenue** // Mobile Communications. - 1997, January 9. - No. 209. - P. 9.
168. **Vendors back GSM for Europe's third generation** // Global Mobile. - 1997, August 21. - Vol. 4, No. 16. - P. 2.
169. **What is PHS? PHS charges and services** // JIPDEC Inf. Quart. - 1995. - No. 102. - P. 12 - 27.
170. **Wireless local loop. Developing and exploiting. International conference.** London, November 20 - 22, 1995. Conference Proceedings.
171. **World cellular/wireless subscribers: 500 - 600 million by year-end 2000** // Cellular strategies Herschel Shosteck Associates. - 1997, July-August. - Vol. 3, No. 4. - P. 1 - 4.
172. **World's 40 largest cellular operators** // Global Mobile. - 1997, September 18. - Vol. 4, No. 18. - P. 12.
173. **Wu W. W., Miller E. F., Pritchard W. L., Pickholtz R. L.** Mobile satellite communications // Proc. IEEE. - 1994. - Vol. 82, No. 9. - P. 1431 - 1447.
174. **Yoshimori J.** Telecommunications moves toward digital standards // Microwaves and RF. - 1994. - December. - P. 95 - 100.