

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. Н. Буснюк, Г. И. Мельянец

СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

*Рекомендовано
учебно-методическим объединением по образованию
в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 1-98 01 03
«Программное обеспечение информационной безопасности»*

Минск 2018

УДК 621.391(075.8)

ББК 32.883я73

Б92

Рецензенты:

кафедра телекоммуникационных систем

УО «Белорусская государственная академия связи»

(кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
С. И. Половня);

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
программного обеспечения информационных технологий

УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

П. Ю. Бранцевич

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Буснюк, Н. Н.

Б92 Системы мобильной связи : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-98 01 03 «Программное обеспечение информационной безопасности» / Н. Н. Буснюк, Г. И. Мельянец. – Минск : БГТУ, 2018. – 153 с.

ISBN 978-985-530-726-7.

В учебно-методическом пособии приводятся базовые определения и информация об основных видах мобильной связи, понятия сотовой связи, радиосигнала и его характеристик, частотно-территориального планирования; рассматриваются оборудование систем мобильной связи поколений 2G–4G, проблемы передачи цифрового сигнала и способы защиты от помех, алгоритмы преобразования и передачи радиосигналов.

Пособие предназначено для теоретической подготовки студентов ИТ-специальностей по курсу «Системы мобильной связи».

УДК 621.391(075.8)

ББК 32.883я73

ISBN 978-985-530-726-7 © УО «Белорусский государственный технологический университет», 2018
© Буснюк Н. Н., Мельянец Г. И., 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимость написания данного учебно-методического пособия вызвана, с одной стороны, отсутствием изданной в Беларуси учебной литературы по современным системам мобильной связи и широко доступных для студентов книг зарубежных издательств и, с другой стороны, спецификой специальности «Программное обеспечение информационной безопасности мобильных систем».

С учетом специфики указанной специальности в пособии достаточно подробно рассмотрены способы преобразования и защиты информации от умышленных и неумышленных воздействий.

Структурно книга состоит из четырех основных разделов.

В первом разделе даются основные понятия и определения из области радиосвязи, виды мобильной связи, рассматривается история развития и поколения сотовой связи. Приводятся способы модуляции цифрового сигнала, проблемы его передачи и способы противодействия отрицательным воздействиям на радиосигнал. Рассматриваются методы множественного доступа и организация сотовых сетей – основные элементы архитектуры, территориальное планирование, организация связи.

Во втором разделе рассмотрены стандарты второй генерации мобильных систем – GSM и cdmaOne. Приведены общие характеристики стандартов GSM, планирование сетей GSM и элементы сетей GSM. Отдельный параграф посвящен процедурам обработки цифрового сигнала. Рассмотрена функциональная схема обработки сигналов в GSM, методы канального кодирования, шифрования и организации пакетной передачи в этом стандарте, механизмы противодействия шумовым воздействиям на радиосигнал, алгоритмы аутентификации и определения местоположения мобильной станции.

Рассмотрены технология, структура сети, организация каналов и кодирования.

Организация связи, состав оборудования, способы кодирования информации рассматриваются и для сотовых систем стандарта CDMA. Подробно приведены технология организации многостанционного доступа с кодовым разделением каналов, понятие широкополосного сигнала, процедуры кодирования в прямом и обратном каналах при передаче и при приеме сообщения.

В третьем разделе, посвященном стандартам поколения 3G, рассмотрены технологии переходного периода 2,5G–2,75G, позволившие полностью перейти на пакетную передачу данных. В этом разделе рассматривается семейство систем IMT-2000, и в частности, стандарты UMTS и CDMA2000 как наследники стандартов GSM и cdmaOne. Приводится структура сетей, их особенности и отличия от соответствующих стандартов поколения 2G. Уделено внимание технологии высокоскоростной передачи данных HSDPA.

В четвертом разделе изучаются стандарты поколения 4G – LTE и мобильный WiMAX и применяемые технологии. Приводится структура сетей этих стандартов, различия в оборудовании от стандартов предшествующих поколений, назначение функциональных блоков сети радиодоступа LTE. Рассмотрены принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE, в частности мультиплексирование посредством ортогональных несущих. Уделено внимание стекам протоколов, канальной структуре и особенностям услуг в сетях LTE. Рассмотрены протоколы, действующие в пользовательской плоскости и плоскости управления; виды и назначение существующих в LTE каналов связи; понятие качества услуг связи и связанное с ним понятие PDP-контекста. Отдельно разбирается процедура помехоустойчивого кодирования, используемая в стандарте LTE.

В конце каждого подраздела приводятся вопросы для самопроверки понимания прочитанного материала.

Авторы надеются, что учебно-методическое пособие будет полезно и студентам других специальностей, изучающим инфокоммуникационные технологии и мобильную связь, а также будет использовано преподавателями при подготовке лекционных курсов.

РАЗДЕЛ 1

ОСНОВЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

1.1. Основные виды мобильной связи

Мобильная радиосвязь (отраслевой термин – *подвижная радиосвязь*) – способ связи, при котором доступ к абонентским линиям осуществляется без использования кабеля, а связь с абонентским устройством производится по радиоканалу.

Мобильная связь – это радиосвязь между абонентами, местоположение одного или нескольких из которых меняется. Одним из видов мобильной связи является сотовая связь.

Системы мобильной связи (СМС) включают передающие и принимающие устройства и системы и каналы связи. СМС осуществляют передачу информации между пунктами, один или оба из которых являются подвижными. Характерным признаком систем мобильной связи является применение радиоканала.

В зависимости от назначения системы, объема предоставляемых услуг и размеров зоны обслуживания можно выделить следующие *виды СМС*:

- 1) системы персонального радиовызова;
- 2) системы бесшнуровой телефонии;
- 3) транкинговые системы;
- 4) системы сотовой мобильной связи;
- 5) системы персональной спутниковой связи;
- 6) системы беспроводного доступа к локальным вычислительным сетям.

Системы персонального радиовызова (*пейджинговые*, от англ. paging – вызов). В классической пейджинговой системе связь односторонняя – от базовой станции, связанной с центром обработки вызовов, к выбранной подвижной станции.

Системы бесшнуровой телефонии появились в конце семидесятых годов XX в. Они представляют собой беспроводные средства связи малой мощности, предназначенные для медленно перемещающихся и расположенных недалеко от базовой станции пользователей. Здесь базовая станция – это часть бесшнурового

телефона, которая подключена к коммутируемой телефонной сети общего пользования (ТСОП) как обычный телефонный аппарат.

Транкинговые системы – это системы мобильной связи, предназначенные для построения коммуникационных сетей на крупных предприятиях, оперирующих разнесенными в пространстве ресурсами. Пример такого предприятия – это автопарк, корпоративные радиосети для скорой помощи, служб охраны порядка и др. Характерная особенность таких систем – наличие диспетчерского и управляющего центра, распределяющего вызовы. Становится возможным установление таких видов соединений, которые в обычных телефонных сетях предоставляются только в виде специальных услуг. Пример такого соединения – звонок из диспетчерского центра на все подвижные станции или на какую-то определенную их группу. Другой характерный для транкинговых систем вид звонка – соединение между несколькими подвижными станциями.

Сотовая связь – это наиболее показательный пример систем связи с мобильными объектами. Системы сотовой связи (ССС) обеспечивают двустороннее беспроводное соединение с подвижными станциями, которые могут передвигаться с высокой скоростью по обширной территории, покрытой сетью базовых станций.

Основные составляющие сотовой сети – подвижные станции (в большинстве случаев это мобильные телефоны) и базовые станции, которые обычно располагают на крышах зданий и вышках. Будучи включенным, мобильный телефон прослушивает эфир, находя сигнал базовой станции. После этого телефон посылает станции свой уникальный идентификационный код. Телефон и станция поддерживают постоянный радиоконтакт, периодически обмениваясь информационными пакетами.

Сотовые сети разных операторов соединены друг с другом, а также со стационарной телефонной сетью. Это позволяет абонентам одного оператора делать звонки абонентам другого оператора, с мобильных телефонов на стационарные и со стационарных на мобильные.

Сотовые технологии обеспечивают телефонную связь между подвижными абонентами (ячейками). Связь осуществляется через базовые (стационарные) станции с центром коммутации подвижной связи, выполняющим коммутирующие функции. Разработано несколько стандартов мобильной связи. Одной из наиболее широко распро-

страненных технологий мобильной связи (в том числе и в Беларуси) является технология, соответствующая стандарту для цифровых сетей сотовой связи GSM (Global System for Mobile Communications). GSM может поддерживать интенсивный трафик (270 кбит/с), обеспечивает роуминг (т. е. автоматическое отслеживание перехода мобильного пользователя из одной соты в другую), допускает интеграцию речи и данных и связь с сетями общего пользования. Используются разновидности: сотовая связь GSM-900 в частотном диапазоне 900 МГц (более точно 890–960 МГц) и микросотовая связь GSM-1800 в диапазоне 1800 МГц (1710–1880 МГц). Название «микросотовая» обусловлено большим затуханием и, следовательно, меньшей площадью соты. Однако увеличение числа каналов выгодно при высокой плотности абонентов. Мощность излучения мобильных телефонов составляет 1–2 Вт.

В СТБ 1356-2011 устанавливаются общие технические требования к системам сотовой подвижной электросвязи в Республике Беларусь. В стандарте оговариваются диапазон частот, в которых функционируют системы GSM, UMTS и LTE, требования к радиооборудованию, функции, которые должны обеспечивать системы GSM, UMTS и LTE. В приложениях СТБ устанавливаются требования к уровням радиопомех и устойчивости к радиопомехам, к качеству услуг сотовой подвижной электросвязи, параметры радиочастотного спектра, обеспечивающие электромагнитную совместимость РЭС, параметры радиointерфейса базовых станций, подвижных станций, а также параметры интерфейсов.

Спутниковые системы характеризуются одно- или двунаправленной передачей речи или данных с невысокой скоростью, но на очень большие расстояния. Емкость системы строго зависит от количества используемых спутников. Однако увеличение количества спутников вызывает существенный рост стоимости системы. В разные годы было представлено несколько спутниковых систем, известных под названиями Iridium, Globalstar, ICO (ранее известной как Inmarsat-P) и др. Все они используют спутники, расположенные на средних или низких орбитах.

В последнее время появилась новая категория систем подвижной связи. Беспроводные технологии были применены для реализации **беспроводного доступа к компьютерным сетям**. Условия функционирования и задачи таких систем, обозначаемых как WLAN (англ. Wireless Local Area Networks – беспроводная

локальная вычислительная сеть), отличаются от описанных выше. Прежде всего, предполагается, что зона покрытия такой системы и мобильность пользователя весьма ограничены.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение мобильной радиосвязи.
2. Определите понятие «системы мобильной связи».
3. По каким признакам можно классифицировать СМС?
4. Что такое «пэйджинговые системы»?
5. Что представляют собой системы бесшнуровой телефонии?
6. Где применяются транкинговые СМС? В чем их характерная особенность?
7. Как организованы системы сотовой мобильной связи?
8. Какие общие технические требования к системам сотовой подвижной электросвязи в Республике Беларусь установлены в СТБ 1356-2011?
9. Что является основным сдерживающим фактором в развитии спутниковых СМС?
10. Можно ли отнести «беспроводной доступ к компьютерным сетям» к виду мобильной связи и почему?

1.2. История развития и поколения сотовой связи

Стандарты 1-го поколения 1G. Первые системы двусторонней радиотелефонной связи между подвижными объектами появились около 40 лет назад. Связь осуществлялась на фиксированных частотах, а передаваемые сигналы занимали в эфире широкую полосу частот. С развитием техники традиционной радиосвязи возникли проблемы, связанные с ограниченным частотным ресурсом и низкой пропускной способностью таких систем.

Идея создания сотовых систем была основана на разбиении обслуживаемой территории на небольшие зоны (соты), в каждой из которых размещена, как правило, одна базовая станция. Такой принцип организации связи позволяет увеличить число абонентов и повысить качество связи за счет повторного использования одних и тех же частот в различных сотах.

В начале 80-х гг. XX в. в ряде стран были развернуты коммерческие системы сотовой связи, использующие для передачи речи

аналоговую частотную модуляцию. Одной из первых начала предоставлять услуги система NMT-450 (Nordic Mobile Telephone), созданная в 1981 г. рядом Скандинавских стран. Вскоре появились и другие системы, работающие в диапазоне частот 400–500 МГц. Это были системы стандарта C-450 (Германия), Radiocom-2000 (Франция), RTMS-101H (Италия).

Наиболее мощный толчок к разработке новых систем мобильной радиосвязи был дан, когда началось интенсивное освоение диапазона частот 800–900 МГц. С появлением таких систем, как AMPS (США), NMT-900 (Скандинавские страны), TACS и ETACS (Англия), HCMTS, J-TACS (Япония), началась эра *систем мобильной сотовой связи* (СМСС). Все перечисленные стандарты являются аналоговыми и относятся к первому поколению систем сотовой связи.

Во всех аналоговых стандартах применяются частотная модуляция для передачи речи и частотная модуляция для передачи информации управления (или сигнализации). Для передачи информации различных каналов используются различные участки спектра частот – применяется метод множественного доступа с частотным разделением каналов FDMA, с полосами каналов в различных стандартах от 12,5 до 30 кГц. С этим непосредственно связан основной недостаток аналоговых систем – относительно низкая емкость. Другие недостатки: возможность прослушивания переговоров, наличие двойников, перегруженность частотного диапазона вследствие его неэффективного использования, ограниченность зоны действия.

Стандарты 2-го поколения 2G. Развитие цифровых технологий с одной стороны и частые примеры исчерпания аналоговыми системами абонентской емкости (особенно в больших городах) с другой стороны привели к разработке систем второго поколения.

Первые проекты цифровых систем сотовой связи второго поколения появились в начале 90-х гг. Они отличались от аналоговых систем двумя принципиальными качествами:

а) возможностью использования спектрально-эффективных методов модуляции в сочетании с временным (TDMA) и кодовым (CDMA) разделением каналов вместо традиционно используемого в аналоговых системах частотного разделения каналов (FDMA);

б) предоставлением пользователям широкого спектра услуг за счет интеграции передачи речи и данных с возможностью шифрования (засекречивания) данных.

В США к 1992 г разработана двухрежимная аналого-цифровая система, стандарт получил наименование D-AMPS, или IS-54 (IS – сокращение от Interim Standard, то есть «промежуточный стандарт»). В Европе разработан единый общеевропейский стандарт GSM (GSM 900 – диапазон 900 МГц). 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. – PDC (Personal Digital Cellular – буквально «персональная цифровая сотовая связь»).

Стандарт D-AMPS стал полностью цифровым в версии IS-136, которая начала применяться в 1996 г. Стандарт GSM в 1989 г. пошел на освоение нового частотного диапазона 1800 МГц. Более широкая рабочая полоса частот в сочетании с меньшими размерами сот позволила строить сотовые сети значительно большей емкости. В 1996 г. было принято решение именовать ее GSM 1800. В США в диапазоне 1900 МГц работает система персональной связи PCS.

Эксплуатация первой коммерческой сотовой системы подвижной связи *на базе технологии CDMA* была начата в сентябре 1995 г. в Гонконге. Система CDMA применяется в основном в тех случаях, когда требуется построить сеть повышенной емкости или с более высоким качеством передачи речи.

Промежуточные стандарты 2,5G.Packetная радиосвязь общего пользования GPRS (англ. General Packet Radio Service) – это надстройка над технологией мобильной связи GSM, осуществляющая пакетную передачу данных. Режим GPRS позволяет пользователю мобильного телефона производить обмен данными с другими устройствами в сети GSM и с внешними сетями, в том числе интернет. GPRS предполагает тарификацию по объему переданной/полученной информации, а не времени.

Технология EDGE (англ. Enhanced Data rates for GSM Evolution) – это дальнейшее развитие GPRS, отличающееся только способом кодирования данных, что позволяет за один таймслот передавать больший объем данных. EDGE иногда называют 2,75G.

Мобильная технология передачи цифровых данных 1xRTT (One Times Radio Transmission Technology) основана на CDMA-технологии. Она использует принцип передачи с коммутацией пакетов. Данная технология официально относится именно к стандартам третьего поколения, все же ее нередко сопоставляют с се-

тиями поколений 2.5G и 2.75G, с которыми она имеет массу сходств и вполне может сравниваться.

Стандарты 3-го поколения 3G. Цифровые системы третьего поколения основаны на методе множественного доступа с кодовым разделением каналов CDMA.

Первый стандарт 3G был разработан в 1992–1993 гг. в США и назывался IS-95 (диапазон 800 МГц). Он начал применяться с 1995–1996 гг. в Гонконге, США, Южной Корее, а в США начала использоваться и версия этого стандарта для диапазона 1900 МГц.

В то же время был разработан стандарт UMTS, получивший наибольшее распространение в странах Европы и СНГ. Основой этого стандарта стала технология W-CDMA, являющаяся одним из вариантов CDMA. В зависимости от поддержки телефоном сетей UMTS, а также в случае нахождения в зоне покрытия этой сети, связь может обеспечиваться либо посредством GSM, либо посредством UMTS.

Из семейства 3G-стандартов связи наиболее широко распространенный в Европе UMTS использует частотный диапазон 2100 МГц. Для полноценной работы системы требуется несколько полос частот (МГц): 1900–1980, 2010–2025, 2110–2170, 2500–2570 и 2620–2690. Таковы особенности стандарта, обеспечивающего высокоскоростной обмен данными. В Беларуси необходимые диапазоны занимают сразу несколько служб: в 1545–2005 МГц работают службы фиксированной связи силовых ведомств, в 1940–2060 МГц работают средства радионавигационной службы Министерства обороны и Департамента по авиации, в 2110–2200 МГц – средства радиолокационной службы Министерства обороны. В 2006 г. Госкомиссией по радиочастотам Республики Беларусь был разработан план по освобождению частот для сотовой связи третьего поколения.

Промежуточный стандарт 3,5G. Высокоскоростная пакетная передача данных HSPA (High Speed Packet Access) – это технология, являющаяся дальнейшим развитием стандарта UMTS. Она основана на стандарте HSDPA, который регламентирует передачу данных от базовой станции к абоненту, и стандарте HSUPA, регламентирующем передачу от абонента к базовой станции.

Стандарты 4-го поколения 4G. Наиболее часто упоминаемые в прессе технологии поколения 4G и претендующие на них – это LTE, Mobile WiMAX, HSPA+. Наиболее популярны сети WiMAX и LTE. Первую в мире сеть LTE в Стокгольме и Осло

запустил альянс TeliaSonera/Ericsson в 2008 г. Расчетное значение максимальной скорости передачи данных к абоненту составляло 382 Мбит/с, 86 Мбит/с – от абонента.

Стандарт WiMAX не все относят к 4G, т. к. он не интегрирован с сетями предыдущих поколений, таких как 3G и 2G, а также из-за того, что в сети WiMAX сами операторы не предоставляют традиционные услуги связи, такие как голосовые звонки и SMS, хотя и пользование ими возможно при использовании различных VoIP сервисов.

Международный союз электросвязи разрешил сетям HSPA+ называться 4G, т. к. они обеспечивают соответствующие скорости.

Как и для UMTS, сложилась похожая ситуация с рабочими диапазонами для систем широкополосного доступа вроде Wi-Fi и WiMax. Они используют частоты 2,2–6,5 ГГц. Диапазоны 3400–3500 МГц и 5650–5725 МГц уже открыты при условии соблюдения электромагнитной совместимости с уже существующими системами – на практике это обозначает ограничение мощности передатчика, а значит, и площади покрытия для одной базовой станции. А вот для диапазонов 2300–2400 МГц, 2500–2570 МГц, 2620–2690 МГц, 3500–3600 МГц, 3600–3800 МГц, 5470–5650 МГц, 5725–6425 МГц также необходима конверсия.

Поколение 5G. Пятое поколение мобильной связи разрабатывается на основе стандартов телекоммуникаций, следующих за существующими стандартами 4G/IMT-Advanced. В настоящее время стандартов для развертывания 5G-сетей не существует.

Исходя из того, что новые поколения стандартов сотовой связи появлялись в среднем каждые 10 лет, с первого 1G (NMT) в 1981 г., 2G (GSM) в 1992 г., 3G (WCDMA/FDMA) в 2001 г., 4G (3GPP LTE, WiMax) в 2010 г., внедрение международного стандарта 5G можно ожидать в районе 2020 г.

Предполагается, что технологии 5G будут обеспечивать более высокую пропускную способность по сравнению с технологиями 4G, что позволит обеспечить большую доступность широкополосной мобильной связи, а также использование режимов device-to-device (букв. «устройство с устройством»), сверхнадежные масштабные системы коммуникации между устройствами, а также более короткое время задержки и меньший расход энергии батареек, чем у 4G-оборудования.

В табл. 1 приведены некоторые основные сведения о поколениях сотовой связи.

Таблица 1

Характеристика поколений мобильной телефонии

Поколение	1G	2G	2,5G	3G	3,5G	4G
Начало разработок	1970 г.	1980 г.	1985 г.	1990 г.	До 2000 г.	2000 г.
Реализация	1984 г.	1991 г.	1999 г.	2002 г.	2006–2007 гг.	2008–2010 гг.
Сервисы	Аналоговый стандарт, речевые сообщения	Цифровой стандарт, поддержка коротких сообщений	Большая емкость пакетных данных, увеличение скорости	Еще большая емкость, скорости до 2 Мбит/с	Увеличение скорости сетей третьего поколения	Большая емкость, IP-ориентированная сеть, поддержка мультимедиа, скорости до сотен мегабит в секунду
Скорость передачи	1,9 кбит/с	9,6–14,4 кбит/с	115 кбит/с (1 фаза), 384 кбит/с (2 фаза)	До 3,6 Мбит/с	До 42 Мбит/с	100 Мбит/с – 1 Гбит/с
Стандарты	AMPS, TACS, NMT	D-AMPS, cdmaOne, GSM, PDC	GPRS, EDGE (2.75G), 1xRTT	W-CDMA, CDMA-2000, UMTS	HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+	LTE-Advanced, WiMax Release 2 (IEEE 802.16m), Wireless MAN-Advanced
Сеть	PSTN	PSTN	PSTN, сеть пакетной передачи данных	Сеть пакетной передачи данных	Сеть пакетной передачи данных	Сеть пакетной передачи данных

Телефонная сеть общего пользования PSTN (Public Switched Telephone Network) – это абонентская сеть связи, для доступа к которой используются телефонные аппараты, АТС и оборудование передачи данных.

Приведенные в табл. 1 сведения о поколениях сотовой связи следует дополнить еще одной весьма важной характеристикой, отличающей их друг от друга – методом множественного доступа.

Вопросы для самопроверки

1. В чем суть сотовой связи?
2. В каком году начались разработки в области систем сотовой связи?
3. В каком году введены в эксплуатацию системы сотовой связи поколения 2G?
4. В каком поколении сотовой связи стала применяться пакетная передача данных?
5. Какие стандарты мобильной связи поколений 1G и 2G получили распространение на территории Америки? В регионе Юго-Восточной Азии? В Европе?
6. Сколько фаз развития стандарта GSM было предложено его разработчиками, и чем они отличались между собой?
7. Когда и где впервые введена в эксплуатацию сотовая система мобильной связи на базе технологии CDMA?
8. Какие стандарты объединил промежуточный стандарт 3,5G?
9. Почему стандарт WiMAX не все относят к 4G?
10. Каковы перспективы стандартов поколения 5G?

1.3. Методы множественного доступа

Понятие множественного доступа связано с организацией совместного использования ограниченного участка спектра многими пользователями. В СМС наиболее распространены три базовых варианта множественного доступа: с частотным, временным и кодовым разделением каналов.

Множественный доступ с частотным разделением FDMA. В методе FDMA каждому пользователю на время сеанса связи выделяется своя полоса частот (частотный канал). Метод FDMA характерен для аналоговых систем мобильной связи, при этом полоса частот составляет 10–30 кГц. Основной недостаток метода

FDMA – недостаточно эффективное использование полосы частот. Эффективность заметно повышается при переходе к более совершенному методу TDMA, что позволяет соответственно повысить емкость системы сотовой связи.

Множественный доступ с временным разделением TDMA. В методе TDMA каждый частотный канал разделяется во времени между несколькими пользователями, т. е. по очереди предоставляет несколько пользователям на определенные промежутки времени. Практическая реализация метода TDMA требует преобразования сигналов в цифровую форму и «сжатия» информации во времени. Цифровая обработка сигналов и схема TDMA используются в стандартах 2-го и последующих поколений сотовой связи. Однако метод TDMA не реализует всех возможностей по эффективности использования спектра; дополнительные резервы открываются при использовании иерархических структур и адаптивного распределения каналов. Преимущество в этом отношении имеет метод CDMA.

Множественный доступ с кодовым разделением CDMA. В методе CDMA большая группа пользователей (например, от 30 до 50) одновременно использует общую относительно широкую полосу частот (не менее 1 МГц). Каналы трафика при таком способе разделения среды создаются присвоением каждому пользователю отдельного кода, который распространяется по всей ширине полосы. В данном случае не существует временного разделения, и все абоненты постоянно используют всю ширину канала. Вещание абонентов накладывается друг на друга, но поскольку их коды отличаются, они могут быть легко дифференцированы. Как и TDMA, метод CDMA может быть реализован только в цифровой форме.

Основные принципы метода – расширение спектра за счет модуляции (преобразования) сигнала и кодовое разделение физических каналов – определяют общие достоинства метода CDMA: высокую помехоустойчивость, хорошую приспособленность к условиям многолучевого распространения, высокую емкость системы.

В CDMA регулировка уровней сигналов, применение секторных антенн на БС и использование принципа «речевой активности» (станция излучает лишь тогда, когда абонент говорит, и не излучает в паузах речи), оперативное изменение числа задействованных каналов связи в пределах имеющегося ресурса позволяют практически реализовать предельно малое допустимое отношение сигнал/помеха, т. е. получить предельно большие пропускную

способность и емкость системы. Эти технические особенности CDMA обеспечивают высокие характеристики метода. С другой стороны, их реализация достаточно сложна.

В методе CDMA нет защитных интервалов, как в методе TDMA, а большое число знаков в используемых кодовых последовательностях облегчает сохранение конфиденциальности передаваемой информации. Высокая помехоустойчивость 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.

Ортогональный многостанционный доступ с частотным разделением каналов – OFDMA. Ортогональный многостанционный доступ с частотным разделением каналов базируется на системе мультиплексирования OFDM. Ортогональное частотное разделение каналов (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multi-plexing) – методика мультиплексирования, которая разделяет полосу канала на множество поднесущих частот. В системе OFDM входной поток данных разделен на несколько параллельных подпотоков с уменьшенной скоростью передачи данных (с увеличением продолжительности каждого передаваемого на этой частоте знака). Каждый подпоток модулируется и передается на отдельной ортогональной поднесущей частоте. Протокольная единица, передаваемая с помощью одной несущей, называется *символом*. Увеличенная продолжительность символа улучшает устойчивость OFDM, уменьшая максимальный разброс между длительностью символов, передаваемых с помощью разных несущих. Минимальной частотно-временной единицей формирования канала является один *слот*. Эта единица поддерживается физическим уровнем в обоих направлениях.

Сравнение методов множественного доступа. 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 обязательного использования достаточно сложных технических решений. Такими решениями являются аккуратная регулировка уровня сигналов, применение секторных антенн и отработка «речевой активности», точная синхронизации БС (например, при помощи спутниковой геодезической системы GPS), при этом возможна потеря 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 в три раза, а при полускоростном кодировании – в шесть раз, то получается, что переход от TDMA к CDMA может обеспечить примерно трехкратное увеличение числа каналов.

Однако фактически возможно более сильное влияние помех в CDMA, чем принималось в расчетах, а также в некоторых ситуациях может возникнуть необходимость более плотного расположения БС. Эти факторы ведут к снижению емкости системы. Кроме того, метод TDMA имеет дополнительные возможности: скачки по частоте (предусмотренные, в частности, стандартом GSM), которые, в сочетании с прерывистым излучением (отработкой «речевой активности») и оперативной регулировкой мощности излучения, смягчают влияние «релеевских» 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.

OFDMA (в противоположность CDMA и TDMA) базируется на методе пространственного кодирования сигнала MIMO (многоканальный вход – многоканальный выход). Характерная особенность MIMO в том, что устройства обладают несколькими соединениями к одной соте, что приводит к улучшению стабильности связи и значительному уменьшению времени задержки. Это также повышает пропускную способность соединения. Тем не менее, имеется у MIMO один существенный недостаток. Чем дальше находятся друг от друга вышки других операторов, тем лучше всего действует MIMO. Но при небольшой отдаленности вышек друг от друга возникают помехи, в результате которых серьезно падает производительность сети.

Вопросы для самопроверки

1. Как организуется множественный доступ с частотным разделением каналов? В каких стандартах он применялся?
2. Как организуется множественный доступ с временным разделением каналов? Для какой формы сигнала он применим?

3. Как организуется множественный доступ с кодовым разделением каналов?
4. Почему в методе CDMA нет защитных интервалов?
5. В чем суть разделения каналов по системе OFDM?
6. Что дает увеличенная продолжительность символа в системе OFDM?
7. При использовании какого из методов, CDMA или TDMA, емкость системы мобильной связи больше?

1.4. Сигнал и его основные характеристики

1.4.1. Виды сигналов, применяемые в телекоммуникации

Сигнал – это средство передачи информации из одного пункта в другой. Все сигналы, применяемые в телекоммуникациях, можно разделить на два основных вида: аналоговые и цифровые. Изначально в природе вся информация возникает и воспринимается в *аналоговом* виде, т. е. определена для любого момента времени.

Цифровой сигнал. Цифровая информация – это набор данных, т. е. она дискретна. Соответственно, цифровой сигнал определен только для отдельных моментов времени. Цифровую информацию принято кодировать двоичным кодом, например, «0» и «1». Соответственно и цифровой сигнал, как правило, принимает одно из двух возможных значений (реже используется три и более значения, например, для увеличения помехозащищенности или информационной емкости элементов сигнала). Таким образом, цифровой сигнал представляет собой последовательность резко сменяющихся друг друга значений (рис. 1). Причем, чем более резким будет переход между уровнями сигнала, тем более точно можно будет декодировать исходный сигнал.

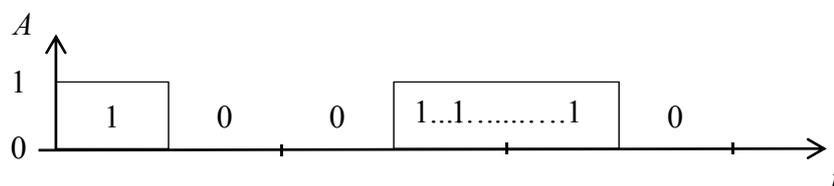


Рис. 1. Цифровой сигнал

Мы рассматриваем способ передачи информации с помощью электромагнитных сигналов, т. е. электросвязь. Этот способ связи

предусматривает передачу информации за счет изменения какого-либо параметра несущего электрического сигнала. Данный процесс получил название *модуляции*.

В простейшем случае в качестве несущего сигнала выступает синусоида ($\sin(x)$). Синусоида представляет собой плавное изменение напряжения в проводнике от некоего минимума до некоего максимума циклически с определенным периодом. Любой сигнал, равно как и синусоида, обладают тремя основными параметрами: амплитудой, частотой и фазой (рис. 2).

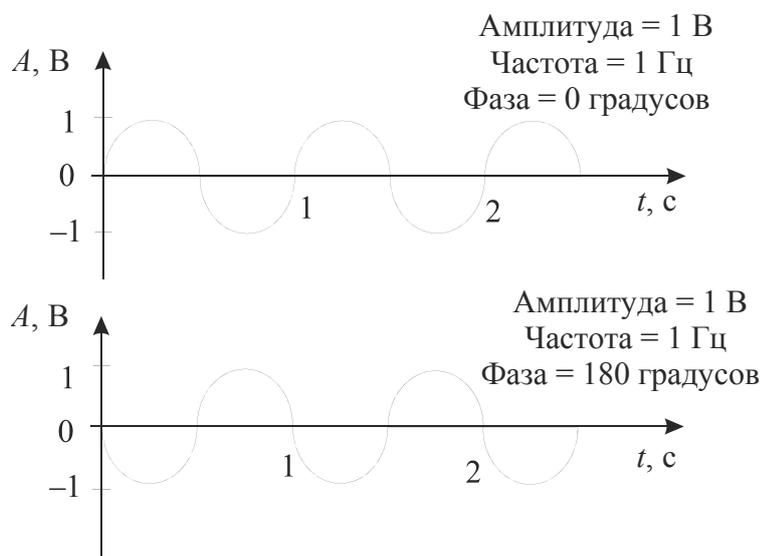


Рис. 2. Графическое представление параметров сигнала

1.4.2. Основные характеристики сигнала

Амплитуда – это максимальное отклонение напряжения сигнала от нулевого порога в область положительных или отрицательных значений. Представляет собой пределы, в которых изменяется сигнал. Амплитуда обычно измеряется в Вольтах (В). Если амплитуда будет слишком большой, то проводник может перегреться и выйти из строя. При недостаточном напряжении сигнал будет затухать в проводнике слишком быстро и не достигать получателя.

Частота – это количество колебаний сигнала в единицу времени. Для стандартизации в качестве единицы времени используется одна секунда. Единицей измерения частоты служит Герц (Гц). Один Герц соответствует одному колебанию сигнала в секунду, т. е. одному последовательному переходу из максимального в минимальное значение и в обратном направлении. Величиной обратной

частоте является период, который показывает задержку времени между соседними значениями сигнала равной величины.

Фаза показывает, из какого первоначального значения начинает изменяться синусоида. Фаза измеряется в градусах или радианах.

Для передачи сигнала используются каналы связи. *Канал связи* – это путь прохождения сигнала.

Основной принцип электросвязи заключается в том, что сигналы не несут информацию сами по себе. Они несут информацию лишь из-за того, что источник и приемник информации условились, что изменение какого-либо параметра несущего сигнала будет означать для другой стороны какую-либо информацию. Наибольшая проблема в процессе передачи информации заключается в возможном мешающем воздействии (предумышленном или случайном) на среду передачи сигнала. Чтобы избавиться от внешнего воздействия, используют различные способы защиты, в том числе специальные методы модуляции.

1.4.3. Виды модуляции цифровых сигналов

При передаче на дальние расстояния (более 100 м) цифровой сигнал начинает терять одно из своих самых важных свойств: помехозащищенность. Это связано с тем, что в качестве среды радиопередачи используются воздушное пространство и проводные каналы связи, а цифровой сигнал в этих средах очень быстро затухает. Использовать ретрансляторы через каждые несколько сотен метров при передаче на дальние расстояния экономически неэффективно. Кроме того, это не всегда технически реализуемо, в частности в сотовых системах связи максимальная удаленность мобильной станции от базовой станции может достигать 35 км.

Также есть еще одно важное свойство, требуемое для цифрового канала связи – *широкополосность*. Цифровой сигнал с резкими переходами между уровнями требует широкой полосы для его передачи. В противном случае переходы между уровнями будут «заламываться» и сигнал будет «смазанным», что может привести к высокому проценту ошибок. Для решения вышеуказанных проблем используют различные методы модуляции цифровых сигналов.

Модуляция – это процесс изменения каких-либо параметров несущего сигнала под действием информационного потока. Данный термин обычно применяют для аналоговых сигналов. Применительно к цифровым сигналам существует другой термин – «ма-

нипуляция», однако его часто заменяют все тем же словом «модуляция», подразумевая, что речь идет о цифровых сигналах.

Передаваемая информация заложена в *управляющем* (модулирующем) сигнале, а роль переносчика информации выполняет высокочастотное колебание, называемое *несущим*. Модуляция, таким образом, представляет собой процесс наложения информационного колебания на известную несущую. В результате модуляции спектр низкочастотного управляющего сигнала переносится в область высоких частот. Это позволяет при организации вещания настроить функционирование всех приемопередающих устройств на разных частотах с тем, чтобы они не мешали друг другу.

В качестве несущего могут быть использованы колебания различной формы (прямоугольные, треугольные и т. д.), однако чаще всего применяются гармонические колебания. В зависимости от того, какой из параметров несущего колебания изменяется, различают вид модуляции.

Существует три основных вида модуляции сигналов: амплитудная, частотная и фазовая. Этот набор модуляций определяется основными характеристиками, которыми обладает любой сигнал.

Амплитудная модуляция (АМ). Амплитудная модуляция – это один из самых простых видов модуляции цифровых сигналов. АМ подразумевает, что для передачи «0» и «1» применяются разные уровни несущего сигнала по напряжению. Например, передаче «0» будет соответствовать 0,5 В, а «1» – 1 В (рис. 3).

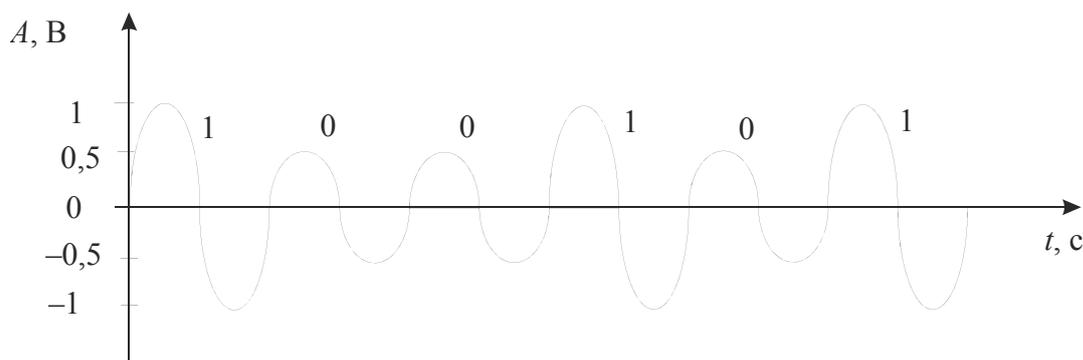


Рис. 3. Амплитудная модуляция

При этом частота и фаза несущего сигнала остаются постоянными. Для повышения помехоустойчивости часто применяют уровни различной полярности (например, «0»: 5 В, а «1»: –5 В). Это наиболее простой из всех видов модуляции. Устройства для

реализации амплитудной модуляции также просты и недороги. Кроме того, амплитудная модуляция требует минимальной ширины полосы пропускания канала связи.

АМ нашла применение в оптических каналах связи, т. к. они гораздо меньше подвержены амплитудным помехам. При этом под амплитудой в оптическом сигнале понимается сила света. Таким образом, наличие или отсутствие светового импульса будет соответствовать двум значениям цифрового потока.

Частотная модуляция (ЧМ). При частотной модуляции в зависимости от передаваемого символа изменяется частота несущего сигнала. Например, для передачи «0» используется частота 5 Гц, а «1» – 10 Гц (рис. 4).

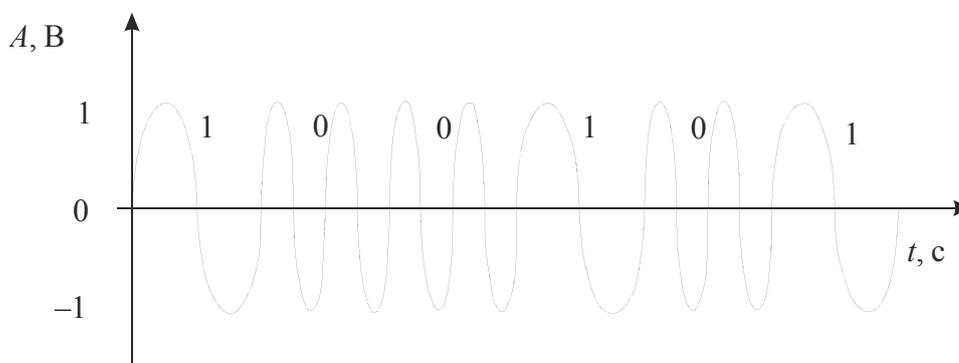


Рис. 4. Частотная модуляция

Этот вид модуляции также несложен в реализации и является более помехоустойчивым, чем амплитудная модуляция. Но в эфире довольно часто наблюдаются помехи, вызванные работой промышленного оборудования (генераторы, трансформаторы). Если передаваемый сигнал окажется в полосе действия таких помех, то возможен высокий процент потери информации или даже полное блокирование канала связи.

ЧМ, так же как и амплитудная, редко применяется на практике. Она используется лишь в хорошо защищенных каналах связи при передаче на небольшие расстояния.

ЧМ применяется для высококачественной передачи звукового (низкочастотного) сигнала в радиовещании (в диапазоне УКВ), для звукового сопровождения телевизионных программ, передачи сигналов цветности в телевизионном стандарте SECAM, видеозаписи на магнитную ленту, музыкальных синтезаторах.

Высокое качество кодирования аудиосигнала обусловлено тем, что в радиовещании при ЧМ применяется большая (по сравнению с шириной спектра сигнала АМ) девиация несущего сигнала, а в приемной аппаратуре используют ограничитель амплитуды радиосигнала для устранения импульсных помех. Такая модуляция называется *широкополосной* ЧМ. В радиосвязи применяется узкополосная ЧМ с небольшой девиацией частоты несущей.

Фазовая модуляция (ФМ). Фазовая модуляция предполагает изменение фазы несущего сигнала в зависимости от передаваемого символа. Для передачи «0», например, может быть использована начальная фаза 0 градусов, а для «1» – 180 градусов (рис. 5).

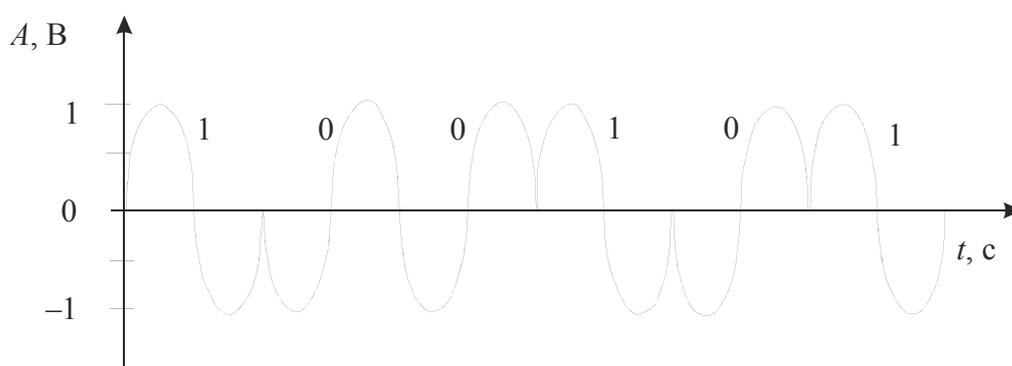


Рис. 5. Фазовая модуляция

Этот вид модуляции более сложен в реализации, но вместе с тем и наиболее помехоустойчив из трех рассматриваемых. Одним из основных недостатков ФМ является эффект «обратной работы» в *фазовом детекторе* (устройстве, выделяющем из модулированного сигнала информационный), когда ошибка в одном символе может привести к ошибочному детектированию всех последующих символов. От этого нежелательного эффекта свободна относительная ФМ (ОФМ). Ее принцип заключается в том, что фаза символа определяется не только текущим значением информационного сигнала, но и значением предшествующих символов.

Вторым существенным недостатком ФМ является необходимость широкой полосы пропускания для передачи модулированного сигнала. Широкая полоса обусловлена расширением спектра из-за резких переходов между фазой предыдущего и последующего символа.

На практике часто применяются не обычная ОФМ, а ДОФМ (двойная относительная фазовая модуляция) или ТОФМ (тройная

ОФМ). Главное их преимущество – это возможность передать в одной посылке сигнала сразу два информационных символа для ДОФМ и три – для ТОФМ. Это достигается за счет использования не двух, а четырех (ДОФМ) или восьми (ТОФМ) начальных фаз. Для ДОФМ, например, могут быть использованы следующие варианты: 0 градусов – передача «00», 90 – «01», 180 – «10», 270 – «11». Аналогично для ТОФМ, только для восьми начальных фаз: 0 градусов, 45, 90, 135 и т. д. Главным тормозящим фактором дальнейшего увеличения информационной емкости одной посылки сигнала является снижение помехозащищенности сигнала. Если фазовое расстояние между соседними символами уменьшается, то ошибка может быть создана меньшей по мощности помехой.

Также существуют и другие варианты ФМ, которые приносят те или иные положительные свойства. Таким образом, ФМ нашла наибольшее применение в системах связи исключительно за счет низкой доли фазовых помех в общей доле нежелательных внешних воздействий.

По характеристикам ФМ близка к частотной модуляции. В случае синусоидального модулирующего (информационного) сигнала, результаты ЧМ и ФМ совпадают.

АМ, ЧМ и ФМ являются базисом и достаточно редко применяются на практике поодиночке. Чаще используются их модификации или в сочетании друг с другом. В частности, в стандарте GSM на радиointерфейсе применяется модуляция GMSK (Gaussian modulation with Minimum Shift Keying) – гауссовская модуляция с минимальным фазовым сдвигом. Главное ее преимущество заключается в том, что модулированный этим методом сигнал занимает гораздо меньшую частотную полосу, чем при обычной ФМ.

Выбор того или иного метода модуляции обусловлен требованиями по помехозащищенности, пропускной способности канала связи, стоимостью реализации оборудования и т. п.

Вопросы для самопроверки

1. Как кодируется цифровой сигнал?
2. Какой процесс называется модуляцией?
3. Назовите основные числовые характеристики сигнала. В чем они измеряются?
4. В чем заключается основной принцип электросвязи?
5. Для чего требуется широкополосность канала связи?

6. Какое частотное колебание называется несущим?
7. В чем заключается амплитудная модуляция?
8. В чем заключается частотная модуляция?
9. Каковы недостатки фазовой модуляции?
10. Какие виды фазовой модуляции применяются в связи?

1.5. Проблемы передачи сигнала

Можно выделить следующие основные проблемы, которые возникают при передаче сигналов по радиointерфейсу:

- затухание сигнала;
- теневые зоны;
- многолучевое распространение сигналов;
- замирания сигнала;
- временные задержки.

1.5.1. Затухание сигнала

Для передачи телекоммуникационных сигналов применяются различные среды: электрический или оптический кабель связи, воздушное пространство и т. п. При этом независимо от выбранного способа передачи первоначальная энергия сигнала, которая была на выходе передатчика, будет уменьшаться. Иными словами, сигнал будет *затухать*. Главным негативным следствием этого процесса будет сложность в приеме сигнала, т. е. если энергия сигнала на выходе канала связи будет меньше некоего уровня (*порога чувствительности приемника*), то сигнал может быть принят с ошибкой.

В зависимости от канала связи причин затухания может быть достаточно много. В любом случае главная причина – неидеальность среды передачи. В частности, электрический канал связи обладает неким сопротивлением, и чем выше это сопротивление, тем выше будут потери. Энергия будет рассеиваться на нагрев проводника. Для оптического канала связи основной причиной затухания являются примеси в проводнике и неоднородности. Из-за наличия примесей и неоднородностей часть полезной энергии переотражается обратно в сторону источника или выходит за пределы оптического волокна.

Для радиоканала существует целый ряд причин затухания. Главной из них является рассеивание энергии сигнала на тепло, т. е. практически радиопередатчик «греет» окружающее пространство. Однако данный вид потерь вполне предсказуем и обладает свой-

ством линейности. Таким образом, зная затухание сигнала для определенной частоты на единицу длины, заранее можно рассчитать необходимую мощность излучения передатчика для передачи сигнала на заданное расстояние.

1.5.2. Теневые зоны

При распространении сигнала от БС он встречает на своем пути различные препятствия искусственного и естественного происхождения. К преградам искусственного происхождения можно отнести жилые здания, производственные корпуса, широкие мосты, путепроводы и т. п. К препятствиям естественного происхождения относятся горы, холмы, обрывы, высокие лесные массивы и т. д.

В зависимости от размеров преграды возможны несколько вариантов: сигнал, возможно, просто будет *огибать* препятствие, либо за встретившимся объектом образуется так называемая *теневая зона* с очень низким уровнем сигнала, либо сигнал будет *отсутствовать* вовсе. Реально затенение создает пульсирующую структуру затухания сигнала.

Обычно объекты, которые могут стать преградой, известны еще до развертывания сети связи, и проектирование осуществляется с самого начала с учетом возможных препятствий. Существует достаточно много решений данной проблемы. Во-первых, для закрытия обширных теневых зон с большим числом потенциальных абонентов в данной зоне может быть установлена дополнительная базовая станция. При этом она может быть в конфигурации с малой емкостью. Если речь идет о малонаселенной теневой зоне, то наиболее разумным решением будет установка *репитера* (переизлучателя). Принцип его работы заключается в том, что репитер забирает емкость какой-либо другой базовой станции и излучает сигнал сотовой связи в заданной местности.

1.5.3. Многолучевое распространение сигналов

Радиосигнал на пути распространения от источника к приемнику может встречать какие-либо преграды. При этом сигнал может быть *поглощен* ими либо *отражен*. После чего этот сигнал снова может быть отражен в сторону получателя. В этом случае данный сигнал достигнет приемника, однако произойдет это с опозданием. С другой стороны, остальная энергия сигнала может достичь приемник без переотражения за более короткое время или

пройти большее число отражений, что в свою очередь приведет к еще большим задержкам. Данный эффект возникает, когда между источником и приемником появляются несколько путей доставки сигнала. При этом энергия сигнала будет распределена между копиями сигнала неравномерно, что в итоге может привести к ситуации, когда приемник не сможет получить достаточно энергии хотя бы в одной из копий для однозначного приема сигнала.

Однако данная проблема имеет и пользу. При многолучевом распространении сигнала приемник получает сразу несколько копий сигнала. Сравнив эти копии между собой, можно выявить и даже исправить ошибки, возникшие при распространении сигнала. Данный принцип положен в основу работы *Rake-приемника* в мобильной станции сотовой связи стандарта UMTS. *Rake-приемник* представляет собой по сути несколько приемников в одном. Каждый из данных приемников настраивается на свой луч, определяет временное смещение от остальных копий. Затем энергия от данных приемников сравнивается и складывается. Таким образом, для *Rake-приемника* лучшей обстановкой является именно многолучевое распространение сигнала, а не беспрепятственное.

В технологии MIMO многолучевое распространение – это необходимый элемент работы приемопередатчиков. Принцип данной технологии основан на том, что информационный поток от одного источника делится между несколькими приемопередатчиками. На приемной стороне также существует набор из такого же числа приемопередатчиков. Таким образом, организуются не один, а много каналов связи, и для них желательно, чтобы были различные пути прохождения сигнала. Практические испытания показали, что чем меньше препятствий между приемопередатчиками MIMO, тем ниже суммарная скорость передачи данных в итоге достигается. Эта технология получила распространение в сетях UMTS и LTE.

1.5.4. Замирания сигнала

В результате многолучевого распространения сигнала может сложиться ситуация, когда две копии сигнала придут в противофазе. Это означает, что копия сигнала может задержаться на промежуток времени, кратный периоду сигнала. В таком случае два луча сигнала могут сложиться в приемнике и нейтрализовать друг друга.

Если окажется, что эти два луча в сумме несли весомую энергию сигнала, то это может привести к увеличению числа ошибок и

снижению качества канала связи. Такое явление получило название «*замирания*» сигнала, т. е. сигнал вроде как перестает на время поступать между источником и приемником.

Одним из видов рассеяния (затухания) сигнала является *релеевское затухание*, которое обусловлено диффузным характером отражения радиоволн от реальных объектов. Как результат, принимаемый сигнал есть сумма многих идентичных сигналов, отличающихся по фазе (и амплитуде тоже). Эффект проявляет себя на уровне радионесущей и дает пульсации уровня – замирания с периодом в пространстве, равным $\lambda/2$. Для GSM-900 это равно $33 \text{ см} / 2 = 17 \text{ см}$. Такой же эффект образуется и по времени, создавая быстрые замирания (пульсации) уровня сигнала.

Выделяют две основные разновидности замираний в зависимости от эффекта, оказываемого ими, и их причины: быстрые и медленные замирания. Медленные замирания вызваны, как правило, плохими метеоусловиями, и существуют достаточно эффективные методы борьбы с ними. Быстрые замирания вызваны преимущественно движением приемника (источника) или препятствиями, близкорасположенными с получателем сигнала. Этот вид замираний частотно селективен, т. е. изменение частоты, на которой ведется передача, может или снизить этот эффект, или полностью его убрать.

1.5.5. Временные задержки

В зависимости от среды распространения и используемой частоты сигнал будет приходиться к получателю с той или иной задержкой. Возникает эффект из-за существенно разнесенных по пространству лучей, т. е. прошедших разной длины пути. Таким образом, можно говорить об интерференции символов от двух лучей. При длительности бита в TDMA 3,7 мкс задержка на 1 бит эквивалентна разности путей около 1 км.

Если задержка для всех посылок сигнала будет постоянна и не будет превышать определенного максимального порога, то она не влечет за собой каких-либо существенных последствий. Обычно борьбу с небольшими задержками (порядка нескольких сотен микросекунд или миллисекунд) ведут, вводя в структуру сигнала небольшие защитные интервалы. Однако если задержка вызвана переотражением или неоднородностью среды распространения, то задержка может начать изменяться и даже выходить за пределы

защитного интервала. Это в свою очередь может привести к наложению двух соседних по времени посылок и потери части информационного потока.

В GSM используется синхронное временное разделение абонентов на данной несущей. При заметном изменении расстояния информация от абонента запаздывает, т. е. начинает «не попадать» в свой временной слот.

Временные задержки могут оказывать не только вред, но и приносить пользу. В частности, в сотовой связи длительность задержки сигнала в радиointерфейсе может говорить о расстоянии до объекта, т. е. до мобильной станции абонента. Эта информация используется для подстройки мощности излучения передатчика. В стандарте GSM, где максимальная дальность связи достигает 35 км, максимальное значение задержки может быть равно 64 единицам. Соответственно расстояние от базовой станции до абонента может быть определено с точностью до 550 м.

Еще одним полезным приложением временных задержек является возможность предоставления сервиса «Определение местоположения». Если мобильная станция получает сигнал одновременно нескольких базовых станций, то зная их географические координаты, вычисление местоположения сводится к обычной геометрической задаче. Причем чем от большего числа базовых станций МС получает сигнал, тем более точным может быть определение местоположения, иногда достигая нескольких десятков метров.

В случае движения источника и приемника сигнала, когда расстояние между ними быстро изменяется, возникает так называемый *эффект Доплера* – эффект относительности, проявляющийся в сжатии-растяжении по времени импульсов дискретного сигнала.

В случае, если импульс заполнен гармонической несущей, можно говорить также об изменении частоты этой несущей.

Обычно используется выражение для частоты:

$$f'_0 = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{2 \cdot V_{\text{объекта}}}{C} \right),$$

где $V_{\text{объекта}}$ – относительная скорость перемещения приемника и передатчика; C – скорость волны в среде ($3 \cdot 10^8$ м/с в нашем случае); f_0 – значение частоты в условиях покоя.

Оценим f'_0 для GSM-900 при $V_{\text{объекта}} = 150$ км/ч (скорость автомобиля):

$$f'_0 = 900 \text{ МГц} \cdot \left(1 \pm \frac{2 \cdot 150 \text{ км/ч}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \right) = 900 \cdot 10^6 \text{ Гц} \cdot \left(1 \pm \frac{2 \cdot 41,66 \text{ м/с}}{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}} \right) = \\ = 900 \text{ МГц} \pm 250 \text{ Гц}.$$

Видно, что эффект Доплера в данных условиях не играет заметной роли. Эффект Доплера существен (смещение десятки/сотни кГц) для абонентов в самолетах и для спутниковых систем.

Вопросы для самопроверки

1. Какие проблемы передачи сигнала выделяют?
2. Что значит «затухание сигнала»? Какие модели существуют для оценки характера распространения радиоволн между базовой станцией и абонентской станцией?
3. Что такое «теневая зона» и когда она возникает?
4. Почему возникает многолучевое распространение сигнала?
5. В чем заключается принцип ММО?
6. Когда возникают замирания сигнала?
7. Что такое «релеевское затухание»?
8. Какому расстоянию эквивалентна задержка передачи сигнала на 1 бит?
9. Как с пользой можно использовать временные задержки сигнала?
10. Что такое «эффект Доплера»?

1.6. Способы противодействия отрицательным воздействиям на радиосигнал

В системах сотовой связи внедрен целый ряд методов борьбы с нежелательными воздействиями на передаваемый сигнал. Некоторые из них используются во многих системах связи, не только радио-, но и проводных (например, помехоустойчивое кодирование). Но существует целый ряд проблем, для которых были специально разработаны уникальные методы, внедренные впервые именно в сотовой связи.

Наиболее значимые способы защиты для сотовой связи следующие: перемежение, разнесенный прием, перескоки по частоте, адаптивная коррекция, помехоустойчивое кодирование, управление мощностью.

1.6.1. Перемежение

Когда передаваемый через эфир радиосигнал подвергается помехам, то многие возникающие ошибки не одиночны по времени, а сгруппированы. Это означает, что длительности воздействующего мешающего сигнала достаточно для возникновения ошибок в нескольких подряд идущих битах. Главная опасность такого вида помех заключается в том, что применяемые способы защиты от помех обычно могут распознать и исправить не более одной ошибки. Групповые ошибки эти виды защиты не определяют, что соответственно может привести к ухудшению качества связи.

Для борьбы с такими ошибками в сотовой связи применяется *перемежение*. Суть его заключается в том, что перед передачей в эфир биты переставляются местами. Например, вместо последовательности «1, 2, 3, 4, 5, 6 ...» создается последовательность: «5, 2, 4, 1, 3, 6 ...». Причем одна и та же схема перемежения обычно накладывается как маска и применяется циклически к цифровому потоку. После перемежения полученная последовательность подвергается дальнейшим преобразованиям, как и обычный цифровой сигнал (рис. 6).

После приема сигнала последовательность подвергается обратной перестановке, чтобы получить исходный сигнал. В случае, если на сигнал будет воздействовать пачечная помеха, например, на подряд идущие биты 3, 6 и 1, то после восстановления исходного потока эти биты окажутся не рядом стоящими и к ним уже можно будет применить стандартные алгоритмы защиты от ошибок (рис. 6).



Рис. 6. Пример перемежения

Очевидно, что чем меньше отрезок сигнала, т. е. чем короче кадр по времени будет подвержен перемежению, тем более коротким

групповым ошибкам он может противостоять. Однако, чем более длительный отрезок сигнала будет вовлечен в перемежение, тем больше это потребует производственных возможностей и дополнительных временных затрат, что может привести к задержкам сигнала. Поэтому на практике выбирают золотую середину: берут достаточно длительный кадр для перемежения, чтобы можно было противостоять групповым ошибкам, достаточно часто встречающимся в радиоэфире. На практике часто применяют несколько ступеней такого перемешивания битов. После первичного перемежения берется кадр, включающий в себя несколько первых кадров перемешивания, после чего еще раз проводят процедуру. Подобная двойная схема перестановки позволяет очень хорошо защитить сигнал и избежать практически всех длительных ошибок в канале связи.

Также к положительным эффектам процедуры перемежения можно отнести повышение помехоустойчивости канала связи. Дело в том, что схемы такой процедуры могут меняться со временем. Это усложняет для противника процесс выделения полезного сигнала и требует больших временных и вычислительных ресурсов.

1.6.2. Разнесенный прием

Одними из наиболее негативных явлений, возникающих в процессе передачи информации через радиоэфир, являются замирания сигнала. Кроме того, во время передачи радиосигнал претерпевает затухание. В итоге на приемной стороне энергия сигнала может оказаться ниже порога чувствительности приемника, что приведет к пропуску сигнала или ошибочному его приему.

Одним из возможных способов борьбы с замираниями и затуханиями сигнала является использование нескольких копий сигнала на приемной стороне. Существует несколько вариантов получения копий сигнала, например, повторная передача. Тогда это будет *временное разнесение*. Также можно передавать один и тот же сигнал на разных частотах – это *частотное разнесение*. Однако подобные способы разнесения требуют дополнительных затрат ресурсов. В сотовой связи используются более экономичные, но не менее эффективные способы разнесения: пространственное и поляризационное. Для реализации *пространственного* разнесения на базовой станции устанавливаются не одна, а две антенны на прием. Причем антенны могут быть установлены с вертикальным

или горизонтальным пространственным разносом. На практике обычно применяется горизонтальное разнесение, т. к. при этом требуется меньшее расстояние между антеннами. От каждой из приемных антенн до приемопередающего оборудования прокладывается отдельный фидер, а уже приемники базовой станции оценивают оба принятых сигнала. В результате вероятность появления эффекта замирания сигнала сразу на двух антеннах значительно снижается. Кроме того, увеличивается суммарная принятая энергия полезного сигнала.

1.6.3. Перескоки по частоте

Некоторые из помех распределены в частотном диапазоне и равномерно воздействуют на различные частотные каналы. К таким помехам относится белый шум, мощность которого равномерно распределена во всем спектре. Однако некоторые мешающие воздействия сосредоточены в каком-то узком частотном диапазоне и оказывают воздействие только на некоторые частотные каналы. Такие помехи называются *частотно-селективными*. Причем они могут быть непрерывными во времени или иметь прерывистый характер, также могут дрейфовать и иметь изменяющуюся мощность. Частотно-селективные помехи опасны тем, что они менее предсказуемы, а их мощность может изменяться в широком диапазоне. Для радиосоединений в сотовой связи это может привести к существенному ухудшению качества или полному разъединению и невозможности установить соединение в течение действия помехи.

Одним из возможных способов борьбы с частотно-селективными помехами может быть увеличение мощности. Однако подобный метод не позволяет бороться с высокими выбросами энергии и не является энергетически эффективным. В сотовой связи большее распространение нашел метод, называемый *перескоки по частоте*. Суть его заключается в том, что во время радиосоединения частотный канал постоянно меняется в пределах заранее заданного набора, известно обеим сторонам передачи (рис. 7).

Смена частотного канала происходит синхронно, поэтому качество соединения не ухудшается. Очевидно, что участвующие в перескоках по частоте каналы не должны быть задействованы на той же или соседних базовых станциях. Также имеет значение количество частотных каналов и их разнос друг относительно друга.

Чем большее число каналов и чем дальше они разнесены друг от друга, тем меньше вероятности возникновения частотно-селективных помех на других каналах. Таким образом, в результате включения данной процедуры, если на каком-либо канале возникнут помехи, то их воздействие будет распределено между всеми установленными соединениями.

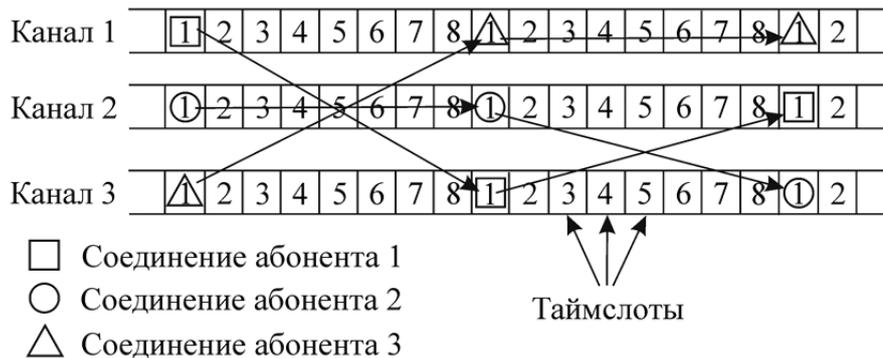


Рис. 7. Пример перескоков по частоте

Применяемые в системах сотовой связи процедуры защиты от ошибок обычно позволяют выявить и исправить только редкие и одиночные ошибки. В результате распределения негативного воздействия общее число ошибок в каждом из соединений уменьшится, а это, в свою очередь, позволит применить алгоритмы защиты от ошибок.

1.6.4. Адаптивная коррекция

Достаточно часто помехи разных типов накладываются друг на друга и оказывают на полезный сигнал суммарное воздействие. В результате на практике сталкиваются с помехой, постоянно меняющейся по мощности, фазе, частоте и ширине спектра. Поэтому необходимо иметь какой-то механизм, который бы позволял компенсировать эти вредные воздействия. Регулирование мощности не позволяет своевременно подстраиваться под изменяющуюся обстановку, т. к. пока будут произведены измерения и отдана команда на изменение мощности, шумовая ситуация уже может несколько раз измениться.

В сотовой связи для борьбы с «быстрыми» изменениями шумовой обстановки используется так называемая *адаптивная коррекция*. Суть ее заключается в том, что вместе с полезным сигналом по частотному каналу передается тестовая последовательность, ко-

торая заранее известна отправителю и получателю. Во время передачи помеха будет воздействовать не только на полезный сигнал, но и на тестовую последовательность. В результате на приемной стороне будет получен «слепок» канала, соответствующий текущей ситуации в канале связи. После получения полезного сигнала и тестовой последовательности в действие вступает *эквалайзер Витерби* (для стандарта GSM). По полученной тестовой последовательности данный эквалайзер изменяет и полезный сигнал. Вместе с передачей следующей порции полезной информации также будет передана новая тестовая последовательность, которая позволит отрегулировать эквалайзер на новую шумовую обстановку.

Очевидным недостатком данного алгоритма является введение избыточной информации в общий поток информации. Кроме того, возникает необходимость в дополнительных вычислительных мощностях на приемной стороне. Вместе с тем производительность современного телекоммуникационного оборудования и ширина каналов связи заранее предусматривает проведение этих процедур и не мешает нормальному процессу обмена информацией. Также адаптивная коррекция обладает еще одним недостатком: используемый канал оценивается только во время передачи тестовой последовательности и может дать лишь примерную информацию о канале связи в остальное время. Но, как показывает практика, даже выборочное тестирование канала дает достаточно полную картину о его состоянии в целом. Поэтому данный метод борьбы с помехами широко применяется не только в стандарте GSM, но и в последующих стандартах сотовой связи.

1.6.5. Помехоустойчивое кодирование

Защиту от ошибок в системах сотовой связи можно разделить на три основных стадии: предупреждение, обнаружение ошибок и исправление. Перемежение, адаптивная коррекция, разнесенный прием в первую очередь используются для предупреждения появления ошибок. Эти методы в совокупности позволяют достаточно эффективно противостоять помехам, затуханию сигнала и другим негативным факторам. Однако избежать появления ошибок в 100% случаев на практике невозможно.

Для обнаружения и исправления ошибок в сотовых системах связи применяется *помехоустойчивое кодирование*. Суть его заключается в том, что в передаваемый цифровой поток вносится

некоторая избыточность. Обычно помехоустойчивое кодирование разделено на две части: обнаружение и исправление ошибок. Для обнаружения ошибок обычно применяется процедура CRC (Cyclic Redundancy Check). Она реализуется путем вычисления контрольной суммы блока информации и передачи ее вместе с полезной информацией. Причем в зависимости от степени важности и скорости передачи информации контрольная сумма может содержать больше или меньше бит. Чем выше важность информации и скорость передачи данных, тем больше контрольных бит нужно передавать. Кроме CRC в различных стандартах может применяться и другой вид кодирования.

Для исправления ошибок применяются другие коды: сверточные, блочные и т. п. Их задача состоит в том, чтобы добавить к передаваемой информации дополнительные биты, которые помогут восстановить исходный сигнал или его часть в случае возникновения ошибки. В зависимости от стандарта (GSM, UMTS и т. п.) разная по важности информация сопровождается различным объемом дополнительных данных. При этом возможно увеличение объема передаваемых данных в два или даже в три раза.

Помехоустойчивое кодирование – это крайний способ защиты от помех. Если он не поможет справиться с ошибками, то искаженные данные будут переданы пользователю. Поэтому на него накладываются высокие требования по надежности. Однако конкретная реализация зависит от используемого стандарта сотовой связи. В зависимости от поколения, технологий передачи данных и используемых средств может вводиться большая избыточность или могут появиться дополнительные коды, но, в любом случае, главная цель остается неизменной.

1.6.6. Управление мощностью

Наиболее очевидный способ противодействия затуханию сигнала – это увеличение мощности передаваемого сигнала. Однако данный процесс не такой простой, как может показаться на первый взгляд.

Главная сложность заключается в том, что в одной и той же системе работают сразу несколько источников и приемников сигнала, которые близко расположены друг к другу. Для систем UMTS это особенно важно, т. к. необдуманное увеличение мощности одного из передатчиков может привести к снижению каче-

ства и обрыву соединений других абонентов и невозможности доступа новых. Кроме того, как МС, так и БС имеют ограниченные энергетические ресурсы. Поэтому лишняя излучаемая мощность может привести к быстрому разряду аккумулятора для МС и высоким затратам на электроэнергию для БС.

Также нельзя забывать о том, что микроволновое воздействие может оказывать нежелательное воздействие на организм человека. В разных стандартах сотовой связи процесс управления мощностью решался по-разному. В системе GSM был реализован принцип обычной обратной связи. Контроллер базовых станций определяет качество соединения по данным, полученным от МС и БС, которые в свою очередь определяются на основе анализа сигнала от противоположного элемента. После оценки уровня ошибок контроллер отдает команду на снижение или увеличение для МС или БС. Также во внимание принимается удаленность МС от БС. Определение расстояния до абонента возможно по задержке сигнала, т. е. смещению его относительно начала кадра, предназначенного для его передачи.

В стандарте UMTS реализованы сразу три механизма управления мощностью и называются они «петлями». Решение об изменении мощности и команды инициируют сразу три элемента сети: МС, БС и контроллер радиосети. Три петли управления мощностью обеспечивают эффективную борьбу с быстрыми и медленными замираниями, уменьшают воздействия помех и компенсируют затухания сигнала. Также в UMTS управление мощностью решает еще одну важную задачу – борьбу с интерференцией. Дело в том, что абоненты в данной системе работают в одном частотном диапазоне в одной и той же местности. Разделение каналов связи осуществляется на основе принципа WCDMA, т. е. кодового разделения каналов. Из-за неидеальной ортогональности кодов различные соединения могут оказывать воздействие друг на друга, т. е. будет возникать интерференция. Чем больше будет абонентов в зоне действия одной соты, тем выше будет уровень интерференции. Соответственно, будет снижено качество соединений, скорость передачи данных и максимально возможное число абонентов. Наиболее эффективным способом борьбы с интерференцией является снижение уровня мощности. Поэтому для систем сотовой связи стандарта UMTS управление мощностью – это неотъемлемый аспект нормального функционирования системы, и его важность проявляется даже больше, чем в каких-либо других стандартах.

Процесс управления мощностью в системах сотовой связи – это один из наиболее важных и ответственных процессов, от которого зависят качество соединения, количество одновременно обслуживаемых абонентов, степень воздействия на организм и даже стоимость услуг.

Рассмотрен лишь ряд из существующих и применяемых методов. Для каждого конкретного стандарта набор применяемых способов защиты и их настройки могут сильно отличаться. Существенное влияние на комплекс применяемых способов борьбы оказывает способ разделения каналов. Так для стандарта GSM опасны частотно-селективные помехи, когда действие мешающего внешнего источника сосредоточено в узком частотном диапазоне. Для стандарта UMTS возникновение частотно-селективных помех не оказывает существенного воздействия, т. к. энергия полезного сигнала распределена в широкой полосе частот и незначительная потеря существенно не повлияет на общее качество сигнала. Однако системы с WCDMA чувствительны к интерференции и требуют специальных способов управления мощностью.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое «групповые ошибки»? Какой способ борьбы с ними применяется?
2. С какими проблемами передачи сигнала применяется «разнесенный прием»? На каком принципе он основывается?
3. Что такое «поляризационное разнесение»?
4. Что такое «белый шум»?
5. Какие помехи называются частотно-селективными?
6. В чем суть метода «перескоки по частоте»?
7. Что такое «тестовая последовательность» и когда она применяется?
8. Каковы три основные стадии защиты от ошибок при передаче сигнала?
9. В чем суть метода помехоустойчивого кодирования?
10. Для чего применяется управление мощностью?

1.7. Организация сотовых сетей

1.7.1. Элементы сотовых сетей связи

Оборудование сетей включает в себя мобильные (телефоны, смартфоны и т. д.) и базовые станции (БС), цифровые коммутаторы, центр управления и обслуживания, различные дополнитель-

ные системы и устройства. Функциональное сопряжение элементов системы осуществляется с помощью ряда интерфейсов, при этом мобильность реализуется посредством радиointерфейса между мобильными станциями (МС) и подсистемой БС.

Обобщенная схема сотовой сети представлена на рис. 8.



Рис. 8. Обобщенная схема сотовой сети

В каждой соте действует БС, обеспечивающая прием и передачу радиосигналов абонентам. Она включает в себя приемопередающее устройство, антенно-фидерное устройство для образования радиоканалов с МС (абонентскими устройствами) и управляющее устройство (контроллер). Контроллер предназначен для обработки соединений МС с остальной сетью. БС прослушивает соседние БС и сообщает контроллеру БС о качестве приема с тем, чтобы контроллер мог своевременно переключить МС на нужную БС.

Для централизованного управления системой все БС соединяются по выделенным проводным или радиорелейным каналам связи с центром коммутации подвижной связи (ЦК). ЦК осуществляет коммутацию и маршрутизацию, направляя вызовы нужному абоненту, в том числе на внешние сети.

В базе данных ЦК хранятся сведения о местоположении пользователей, технических характеристиках МС, данные для идентификации пользователей.

1.7.2. Планирование сотовых сетей

При планировании сотовых сетей связи вся обслуживаемая территория делится на относительно небольшие зоны (ячейки), которые с точки зрения наиболее плотной упаковки и более приближенной к круговой диаграмме направленности антенны БС представлены в виде правильных шестиугольников. Организация системы связи в этом случае напоминает рисунок сот в пчелином улье, и такие системы называют сотовыми (рис. 9). Приблизительно в центре каждой соты устанавливается БС.

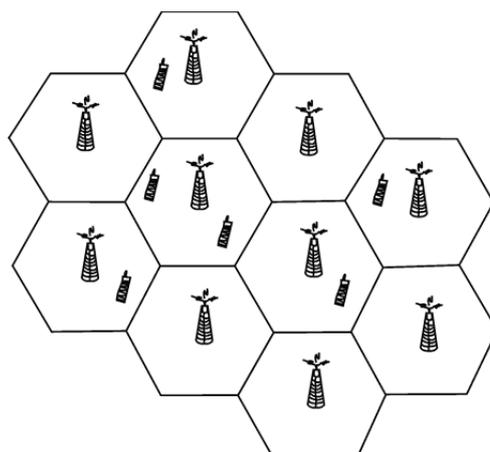


Рис. 9. Разделение зоны обслуживания на соты

Основная идея организации системы сотовой связи (ССС), обслуживающей определенную территорию, заключается в обеспечении доступа к системе многим пользователям при ограниченном частотном ресурсе. Поэтому подходы к планированию и построению территориальных сетей зависят от технологий множественного доступа, что отражается в поколениях сотовой связи. При этом при выборе размера минимальной территориальной структурной единицы сети (соты) учитывается несколько факторов: абонентская нагрузка на соту, уровень взаимных помех, связность системы и др.

В табл. 2 показаны отличия в планировании сетей GSM, W-CDMA, LTE.

Таблица 2

Параметры планирования сетей GSM, W-CDMA, LTE

Параметр	GSM	W-CDMA	LTE
Планирование частотного ресурса	Распределение частотных каналов между БС	Не требуется	Распределение фрагментов полосы системы между пользователями БС
Наличие регулярной методики планирования	Существует	Существует для высокоскоростной и низкоскоростной передачи	Нет
Коммутация	Каналов, пакетов	Каналов, пакетов	Пакетов (все через IP)
Передача информации	Узкополосный сигнал	Широкополосный сигнал	OFDM

Окончание табл. 2

Параметр	GSM	W-CDMA	LTE
Профиль трафика	Речь, мобильный интернет, фоновый трафик	Речь, потоковое видео, мобильный интернет, фоновый трафик	VoIP, потоковое видео, мобильный интернет, фоновый трафик
Тип обслуживания	Речь – СМО с отказами, мобильный интернет – СМО с очередями и приоритетами	Речь – СМО с отказами, мобильный интернет – СМО с очередями и приоритетами, потоковое видео – СМО без задержек	VoIP – СМО с отказами, мобильный интернет – СМО с очередями и приоритетами, потоковое видео – СМО без задержек

Примечание. СМО – система массового обслуживания.

Как показано в табл. 2, для сетей GSM характерно наличие регулярной структуры и частотное распределение каналов между БС. В таких сетях размер соты (радиус описанной вокруг периметра соты окружности) определяется из соотношения

$$R = k \cdot \sqrt{\frac{S_0}{\pi \cdot K_{\text{БС}}}},$$

где S_0 – площадь сети; $K_{\text{БС}}$ – количество базовых станций в сотовой сети; k – коэффициент, учитывающий взаимное перекрытие сот для обеспечения хэндовера.

$K_{\text{БС}}$ определяется из соотношения

$$K_{\text{БС}} = \text{int}\left(\frac{N_{\text{а}}}{N_{\text{БС}}}\right),$$

где $N_{\text{а}}$ – количество абонентов сети; $N_{\text{БС}}$ – количество абонентов, обслуживаемых одной БС. Определяется из соотношения

$$N_{\text{БС}} = M \cdot \text{int}\left(\frac{A}{A_{\text{аб}}}\right),$$

где M – секторность соты; A – допустимая нагрузка на соту при заданной вероятности блокировки; $A_{\text{аб}}$ – средняя активность абонентов. Допустимая нагрузка в соте зависит от числа каналов связи при обеспечении требуемой вероятности блокировки соединения $P_{\text{в}}$.

Для определения допустимой нагрузки в зоне соты используется следующее выражение в зависимости от значения P_B :

$$A = n_0 + \sqrt{\frac{\pi}{2} + 2n_0 \ln(P_B \sqrt{\pi \frac{n_0}{2}})} - \sqrt{\frac{\pi}{2}},$$

где n_0 – число каналов связи.

Группа соседних сот с различными наборами частот образует *кластер*, в котором представлены все рабочие частоты, выделенные данному оператору связи. Количество сот определяет *размерность* кластера. Распределение частотных каналов в сотах при построении кластеров и сети осуществляется с учетом минимизации соканальных помех. Соканальная помеха – это помеха, возникающая в результате приема МС сигнала от БС, находящейся в другой соте.

Уровень помех зависит от размерности кластера C , радиуса сот R и расстояния между сотами с повторяющимися частотами D . Для характеристики плотности плана повторного использования частот используются следующие характеристики: $k_{\text{исп}}$ – коэффициент повторного использования частот; q_s – расстояние между одноименными частотами, оцененное в радиусах сот R , которое определяется как

$$q_s = \frac{D}{R} \approx \sqrt{3k_{\text{исп}}},$$

где D – минимальное расстояние между БС с одноименными частотами, удовлетворяющее заданному требованию интерференции по основному каналу C/I (сигнал/помеха).

В рекомендациях ETSI для стандарта GSM рекомендуется, чтобы величина C/I была не ниже 9 дБ. Соты с одинаковыми частотами должны быть разнесены в пространстве на расстояние не меньше чем $3R$. В системе GSM минимальное значение q_s принято брать равным 3. При проектировании систем сотовой связи с применением плана повторного использования частот можно брать за основу кластерную структуру с коэффициентом повторного использования $k_{\text{исп}} > 3$.

Сети W-CDMA. В сотовых системах, в которых все каналы связи в воздушном интерфейсе работают на одной частоте (W-CDMA), количество одновременно обслуживаемых пользователей влияет на уровень шумов в системе. Следовательно, планирование зоны обслуживания и емкости таких радиосетей (UMTS, cdmaOne, CDMA2000 и др.) не могут быть отдельными этапами планирова-

ния, в отличие от планирования радиосети GSM, где эти два этапа могут четко разграничиваться.

В случае планирования UMTS для каждого конкретного вида услуги необходимо определение и соответственно выполнение требований к качеству обслуживания (QoS). На практике это означает, что самые строгие требования должны определять плотность расположения базовых станций.

При расчете количества абонентов, обслуживаемых одной БС, важным является учет уровня интерференционных помех, т. к. в системе W-CDMA все используют одну частоту. Поэтому абонентская емкость соты и, следовательно, ее размер ограничены уровнем интерференции.

Максимальное количество абонентов в соте системы CDMA в зависимости от минимальной величины C/I , необходимой для нормальной работы системы, может быть оценено из соотношения

$$N_{аб} = \left(\text{int} \left| \frac{SF}{E_b / (N_0 + I_{tr})} \cdot \frac{f_r}{A_{аб}} \right| + 1 \right) \cdot M,$$

где SF – коэффициент расширения спектра сигнала; $E_b / (N_0 + I_{tr})$ – отношение сигнал/(шум + интерференция) в трафик-канале; f_r – коэффициент переиспользования частот.

Сети LTE. Технология LTE, в отличие от технологии GSM обеспечивает каждой БС сети возможность выборочно выделять полосы частот и мощность пользователям в зависимости от их расположения в соте. При этом могут применяться различные модели повторного использования полос частот и, соответственно, появляется возможность максимизировать пропускную способность соты при выполнении требований к качеству радиосвязи в условиях ограниченных ресурсов БС.

Выделяют следующие модели повторного использования полос частот:

- полное повторное использование полос частот каналов;
- жесткое повторное использование полос частот каналов;
- мягкое повторное использование полос частот каналов;
- дробное повторное использование полос частот каналов.

Полным повторным использованием полос частот каналов называют вариант, когда вся полоса частот полностью используется каждой сотой независимо от местоположения абонентов в соте. Распределение ресурсных блоков в этом случае осуществляет

планировщик БС. Расписание о распределении ресурсов БС сообщает МС по специальному управляющему каналу. При этом возникают проблемы с межсотовой интерференцией. В LTE для уменьшения интерференционной связи между сотами применяется динамическая координация назначения полос частот. Применение полного повторного использования полос частот нецелесообразно с точки зрения абонентской емкости, поскольку растет объем служебной информации, необходимой для динамической диспетчеризации.

Жестким повторным использованием полос частот каналов называют вариант, когда вся полоса частот разделена на фиксированное количество полос, которые выделяются сотам в соответствии с некоторой определенной моделью повторного использования (по аналогии с GSM). Каждая из ячеек обслуживается своим передатчиком с невысокой выходной мощностью и ограниченным числом каналов связи. Это позволяет без помех использовать повторно частоты каналов этого передатчика в другой, удаленной на значительное расстояние, ячейке. Теоретически такие передатчики можно использовать и в соседних ячейках. Но на практике зоны обслуживания сот могут перекрываться под действием различных факторов, например, вследствие изменения условий распространения радиоволн. Поэтому в соседних ячейках используются различные частоты.

Мягким повторным использованием полос частот каналов называют вариант, когда вся полоса частот разделена на фиксированное количество полос. Для каждой соты одна из этих полос выделена абонентам, находящимся на границе соты, а остальные полосы используются абонентами, находящимся вблизи базовой станции. Пример мягкого повторного использования частот представлен на рис. 10.

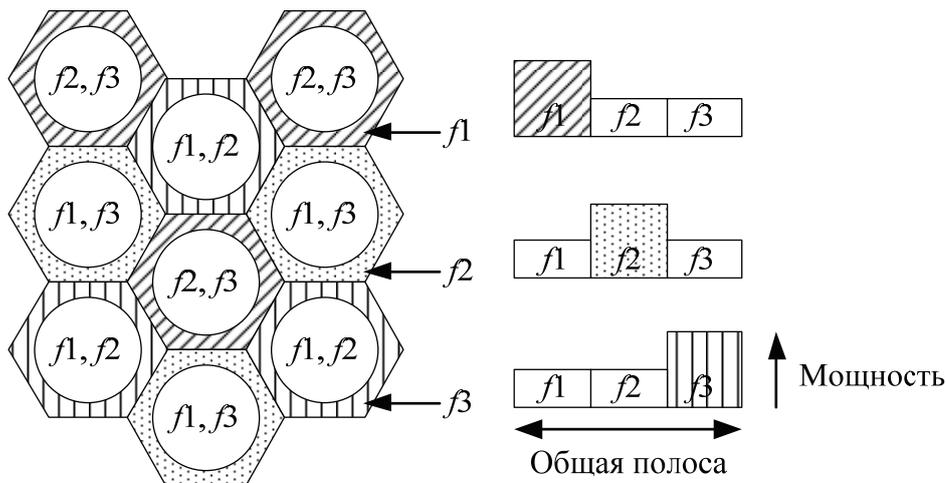


Рис. 10. Мягкое повторное использование полос частот каналов

При дробном повторном использовании полос частот каналов для обслуживания абонентов, которые находятся вблизи БС, используется общая полоса частот. Другие возможные полосы используются абонентами, удаленными от БС (находящимися на краю соты).

В сетях LTE используют только дробное и мягкое повторное использование полос частот каналов, поскольку данные технологии при правильном планировании позволяют увеличить емкость сети.

1.7.3. Организация связи в сотовых сетях

В сотовых системах между БС и мобильной станцией (МС) могут быть установлены каналы связи двух типов: каналы управления и информационные каналы. *Каналы управления* предназначены для обмена информацией, связанной с выполнением заявки на обслуживание, вызовом абонента и установлением соединения между вызывающим и вызываемым абонентом. В свою очередь канал управления делится на прямой (от БС) и обратный (от МС). *Информационные каналы* предназначены для передачи речи или данных между пользователями.

МС постоянно работает в режиме дежурного приема на канале вызова. Предварительно (при включении) выполняется *инициализация* мобильной станции: МС сканирует прямые каналы управления соседних БС и выбирает канал с самым сильным сигналом (ближайшую БС). По свободному обратному каналу управления МС передает в центр коммутации свои персональные данные, которые используются для регистрации МС. Операции обмена служебной информацией с БС регулярно повторяются, пока включена МС. Кроме того, МС следит за сигналами вызова.

В системах мобильной связи должна быть обеспечена непрерывность связи при перемещении абонента из одной ячейки в другую. Для этого МС постоянно сканирует каналы управления соседних БС и выбирает канал с самым сильным сигналом. Это позволяет следить за перемещением МС, и, если МС входит в другую ячейку, выбирается новая БС. Такая организация связи МС называется *эстафетной передачей* (хэндовер), которая выполняется без прерывания сеанса связи и незаметно для абонентов.

Заявка на сеанс связи от МС отправляется по свободному каналу управления через БС на ЦК. ЦК по данным регистрации МС определяет БС, в зоне действия которой в данный момент находится вызываемая МС, и направляет ей номер вызываемого

абонента. БС по прямому каналу управления направляет звонок вызываемому абоненту.

Вызываемая МС в потоке служебной информации прямого канала управления распознает по номеру адресуемое ему сообщение и направляет ответ БС. По этому ответу ЦК устанавливает канал связи между БС, обслуживающими вызывающего и вызываемого абонентов, а также информационные каналы внутри соты, по которым обмениваются информацией БС и МС. Соответствующие сигналы от ЦК передаются на БС, а затем на МС, в результате чего МС перейдут на выделенные им информационные каналы. Если во время сеанса связи МС переходит в зону действия другой БС, то под управлением ЦК старый канал заменяется новым без прерывания сеанса связи.

В пределах каждой соты соблюдается *условие связности*, т. е. каждая БС обеспечивает устойчивую связь с любой МС, находящейся в пределах площади соты. Достоинствами сотовой системы мобильной связи являются высокое качество каналов с мобильными абонентами независимо от того, в какой точке территории они находятся, а также возможность создания больших зон обслуживания.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы три уровня в структуре системы сотовой мобильной связи?
2. Какой интерфейс получил название радиointерфейса?
3. В чем заключается основная идея организации системы сотовой связи?
4. От чего зависят подходы к планированию и построению территориальных сотовых сетей?
5. Какие факторы учитываются при выборе размера соты?
6. Что называется кластером?
7. Что такое «соканальная помеха»?
8. От чего зависит уровень помех в сотовой сети?
9. Что означает показатель C/I ?
10. В чем суть сетей W-CDMA?
11. В чем отличие технологии LTE от технологии GSM?
12. Какие модели повторного использования полос частот применяются в сети LTE?
13. Какие два типа каналов существуют в сотовых системах между БС и МС?
14. Как выполняется инициализация мобильной станции?
15. Что называется эстафетной передачей?

РАЗДЕЛ 2

СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПОКОЛЕНИЯ 2G

2.1. Общие характеристики стандарта GSM

Системы сотовой связи второго поколения используют цифровые методы передачи. Наиболее широкое распространение получили европейский стандарт GSM, американский D-AMPS и японский JDC.

Разработчиками GSM еще в конце 1980-х гг. был предложен поэтапный характер наращивания возможностей системы. Принято выделять *три фазы развития GSM* (рис. 11).

Фаза 1 содержала наиболее общие услуги:

- голосовая телефония;
- международный роуминг;
- базовые службы передачи fax/data (до 9,6 кбит/с);
- перенаправление вызова;
- запрещение вызова;
- служба коротких сообщений (Short Message Service, SMS).

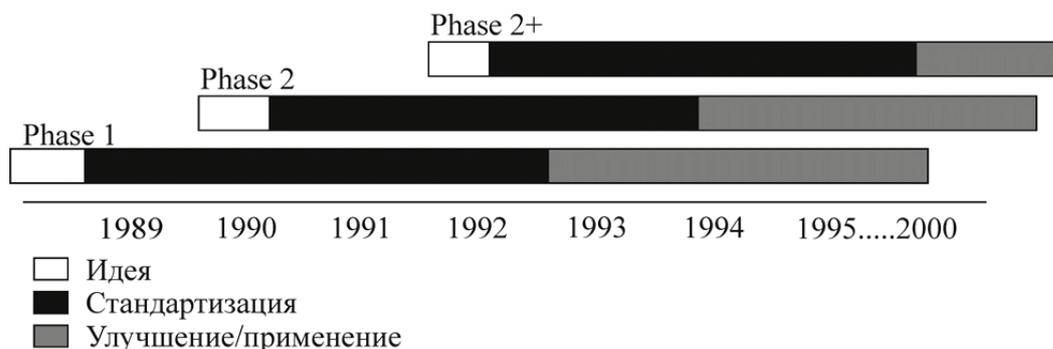


Рис. 11. Фазы развития GSM

Фаза 1 также включала особенности типа шифрования и Модуль Идентичности Подписчика (SIM-card). Спецификации этой фазы закрыты и не могут быть изменены.

Фаза 2 содержала следующие добавочные возможности:

- идентификация вызывающей станции;
- вызов с ожиданием;

- удержание вызова;
- конференцсвязь;
- закрытая группа пользователей;
- дополнительные способности передачи данных.

Фаза 2+ включала бизнес-ориентированные приложения и общее расширение возможностей по передаче данных, а именно:

- HSDCS;
- GPRS;
- EDGE;
- многоплановые профили обслуживания;
- частные планы нумерации;
- джоступ к службам Centrex;
- взаимодействие с GSM1800, GSM1900 и DECT.

Табл. 3 содержит *информацию о стандартах группы GSM*. В ней обозначены: P-GSM – первичная версия GSM (Primary); E-GSM – расширенная версия GSM (Extended).

Таблица 3

Характеристики стандартов сотовой связи GSM

Система	P-GSM-900	E-GSM-900	GSM-1800	GSM-1900
Частоты: «вверх»	890–915	880–915	1710–1785	1850–1910
«вниз»	935–960	925–960	1805–1880	1930–1990
Ширина полосы, МГц	25	35	75	60
Дуплексный разнос, МГц	45	45	95	80
Полоса радиоканала, кГц	200	200	200	200
Количество дуплексных радиоканалов	124	174	374	299
Скорость передачи в радиоканале, кбит/с	270	270	270	270
Метод доступа	TDMA	TDMA	TDMA	TDMA
Метод дуплексирования	FDD	FDD	FDD	FDD
Количество каналов на несущую	8	8	8 (16)	8 (16)
Метод модуляции	GMSK	GMSK	GMSK	GMSK
Отношение сигнал/помеха, дБ	9	9	9	9
Мощность МС (пиковая), Вт	2 0,8	2 0,8	1 0,25	1 0,25
Хэндовер	Да	Да	Да	Да

Стандарты GSM-1800/1900 известны также под названием DCS-1800 (Digital Cellular System) и PSC-1900 (Personal Services Cellular). В таблице МС – мобильная станция (мобильный телефон); сценарии использования частотного пространства: FDD – частотный дуплексный разнос, TDD – временной дуплексный разнос.

Частотный план системы P-GSM-900 показан на рис. 12.

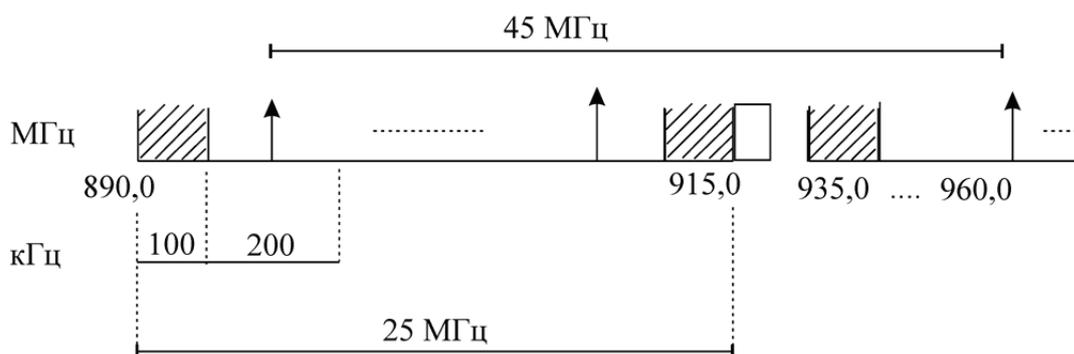


Рис. 12. Частотный план GSM-900

Стандарт P-GSM-900 предусматривает работу передатчиков в двух диапазонах частот. Полоса частот 890–915 МГц используется для передачи сообщений с МС на БС (базовую станцию), а полоса частот 935–960 МГц – для передачи сообщений с БС на ПС. При переключении каналов во время сеанса связи разность между этими частотами постоянна и равна 45 МГц (дуплексный разнос). Разнос частот между соседними каналами связи составляет 200 кГц. Таким образом, в отведенной для приема/передачи полосе частот шириной 25 МГц размещается 124 канала связи и защитные полосы по 100 кГц на краях.

В стандарте GSM используется метод доступа FDMA/TDMA, что позволяет на одной несущей частоте разместить одновременно восемь речевых каналов. В качестве речепреобразующего устройства используется речевой кодек с регулярным импульсным возбуждением и скоростью преобразования речи 13 кбит/с.

Для защиты от ошибок, возникающих в радиоканалах, применяется *блочное и сверточное кодирование с перемежением*. Повышение эффективности кодирования и перемежения при малой скорости перемещения МС достигается медленным переключением рабочих частот в процессе сеанса связи со скоростью 217 скачков в секунду.

Для борьбы с интерференционными замираниями принимаемых сигналов, вызванными многолучевым распространением радиоволн в

условиях города, в аппаратуре связи используются эквалайзеры, обеспечивающие выравнивание импульсных сигналов со средне-квадратическим отклонением времени задержки до 16 мкс. Система синхронизации оборудования рассчитана на компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс. Это соответствует максимальной дальности связи 35 км (максимальный радиус соты).

Для модуляции радиосигнала применяется спектрально-эффективная гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (GMSK). Обработка речи в данном стандарте осуществляется в рамках системы прерывистой передачи речи.

Вопросы для самопроверки

1. Сколько версий стандарта GSM существует?
2. Чему равна ширина одного радиоканала в стандарте GSM?
3. Что такое «дуплексный разнос» и чему он равен для каждой версии GSM?
4. Какова ширина полосы трафика стандарта E-GSM?
5. Как применен метод множественного доступа с разделением по времени в стандарте GSM?
6. Чему равна скорость передачи информации в версиях стандарта GSM?
7. С какой скоростью преобразует речь в стандарте GSM речевой кодек?
8. Какая существует защита от ошибок при передаче сигнала в GSM?
9. Для чего в аппаратуре связи используются эквалайзеры?
10. Для чего в стандарте GSM применяется гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом?

2.2. Планирование сетей GSM

2.2.1. Сотовая структура

Основной идеей, на которой базируется принцип сотовой связи в GSM, является повторное использование частот в несмежных сотах. За каждой базовой станцией закрепляется набор рабочих частот (в простейшем случае это может быть одна частота). Базовые станции с помощью специальных каналов связи (это могут быть проводные или радиоканалы) связаны друг с другом и с центром коммутации, управляющим работой всей системы.

В первом поколении сотовой связи антенна базовой станции имела круговую диаграмму направленности. Мощность радиопередатчика выбирается из условия устойчивого приема сигналов на территории всей соты. В общем случае на территории соседней соты сигнал имеет ненулевое значение, поэтому может нарушать нормальную работу радиосредств соседней ячейки.

Частоты радиоканалов каждой соты для уменьшения взаимного влияния сигналов станций соседних ячеек выбирают по определенному правилу и базовые станции с одинаковым набором частот разносят на величину защитного интервала, за пределами которого взаимное влияние соседних станций пренебрежимо мало.

Основной принцип частотного разделения при планировании сотовой связи поясняет рис. 13 (MS – мобильная станция, BTS – базовая станция, f_i – частота).

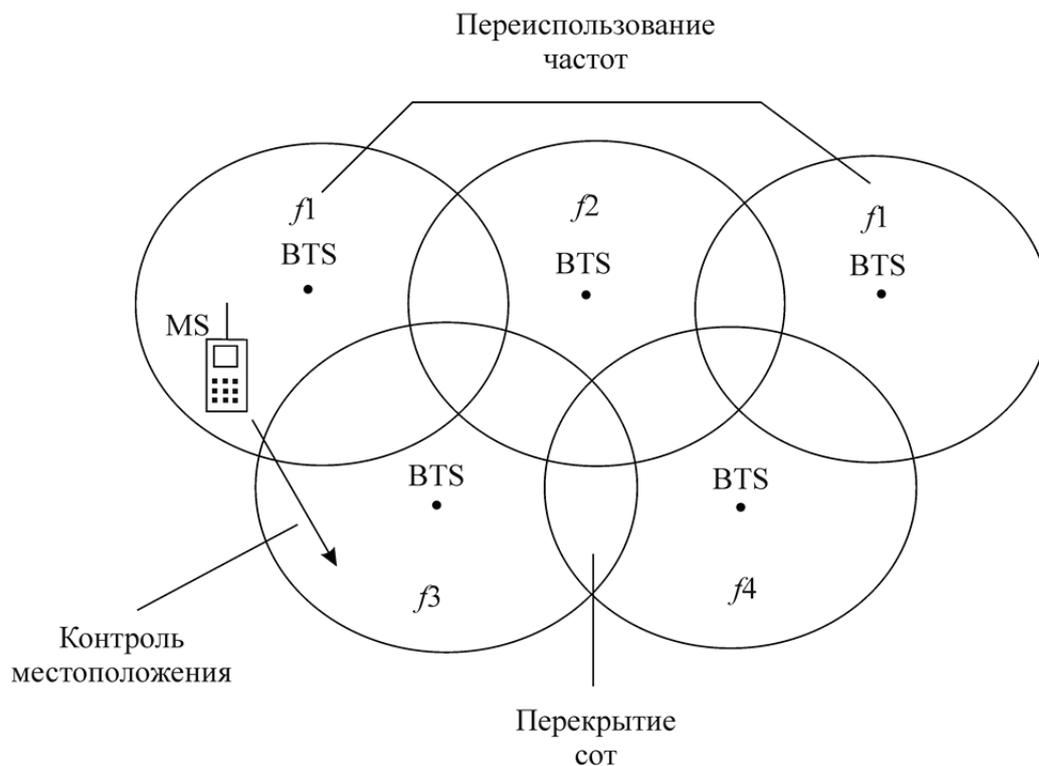


Рис. 13. Принцип частотного разделения

Для этого между базовыми станциями с одинаковыми наборами частот помещают базовые станции с другими наборами рабочих частот. Полный набор частот определяет *размерность* кластера.

На рис. 14 жирными линиями выделены кластеры с количеством частот в наборе, равном семи.

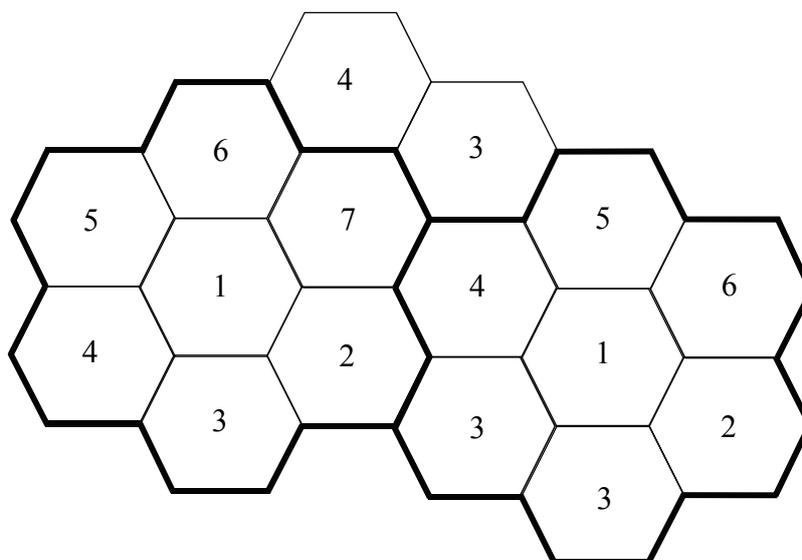


Рис. 14. Кластеры из семи сот

В результате вся обслуживаемая территория покрывается сетью кластеров, и в каждом кластере используется семь различных частотных групп. Таким образом, реализуется принцип повторного использования частот, т. е. на обслуживаемой территории семь рабочих частотных групп будут повторяться столько раз, сколько кластеров образует данную систему. И в то же время работа станций на этих частотах в соседних кластерах теоретически не будет вызывать отрицательного влияния друг на друга. На практике существует некоторый уровень помех на совпадающих частотах от соседних кластеров, который характеризуется *коэффициентом уменьшения соканальных помех* или *коэффициентом использования совмещенного канала*. Количественно коэффициент уменьшения соканальных помех q может быть оценен по соотношению

$$q = \frac{D}{R},$$

где D – расстояние до центра ближайшей соты с совмещенным каналом; R – радиус соты.

Эффективным способом снижения соканальных помех является применение направленных (в горизонтальной плоскости) антенн с шириной диаграммы направленности 120 или 60°, в результате чего шестиугольная ячейка разбивается на 3 или 6 секторов, т. е. производится секторизация сот (рис. 15).

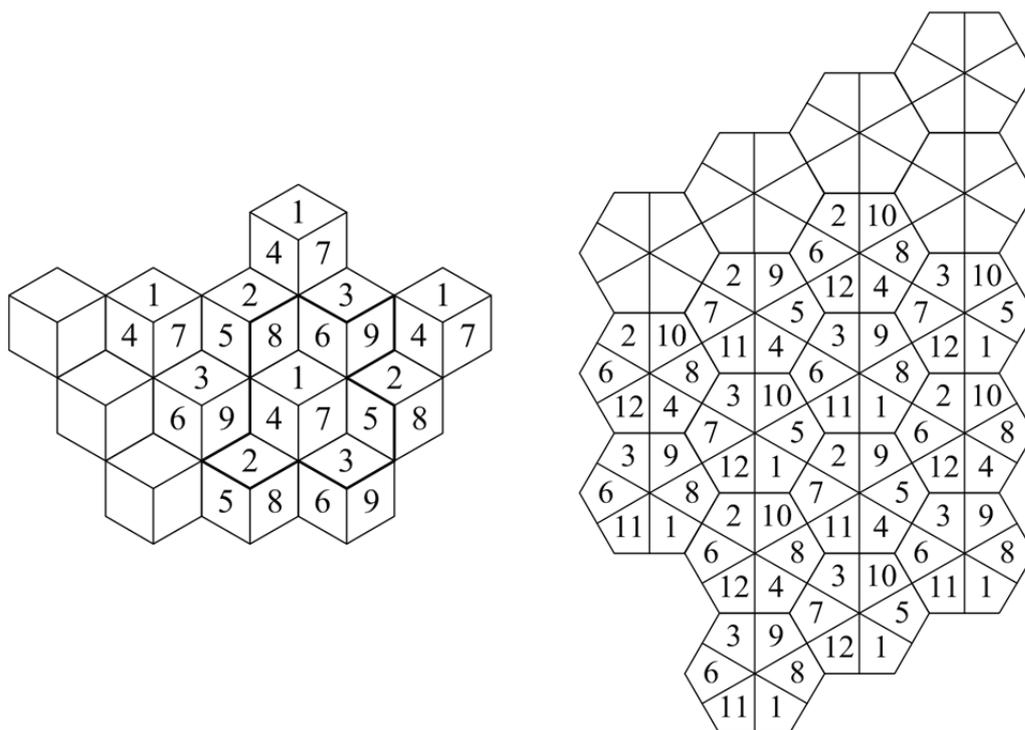


Рис. 15. Варианты структур кластера

В секторе сигнал излучается антенной только в одну сторону, а уровень излучения в противоположном направлении сокращается до минимума. Таким образом, секторизация сот позволяет чаще использовать одинаковые полосы частот в кластерах без изменения их структуры, либо в рамках прежней схемы повторения частот заметно снизить уровень соканальных помех. В этом случае структура повторного использования частот имеет более сложный характер (рис. 16). Метод многократного использования частот позволяет во столько же раз повысить количество обслуживаемых абонентов.

Для дальнейшего увеличения количества обслуживаемых клиентов принимают и другие меры: уменьшают радиус соты на территориях с повышенной концентрацией МС (супермаркеты, аэропорты и т. п.). Типичный размер ячейки сотовой мобильной связи составляет несколько километров, ячейки размерами несколько сот метров называют *микросотами*, а ячейки размерами несколько десятков метров – *пикосотами*.

Деление всей зоны обслуживания на более мелкие подзоны путем введения множества БС обеспечило увеличение количества обслуживаемых клиентов и улучшение качества радиоканалов за счет устранения теневых зон (зон пропадания сигнала).

2.2.2. Выбор геометрических параметров ячейки

Разделить обслуживаемую территорию на ячейки (соты) можно двумя способами, основанными:

- 1) на измерении статистических характеристик распространения сигналов в системах связи;
- 2) на измерении или расчете параметров распространения сигнала для конкретного района.

При реализации первого способа вся обслуживаемая территория разделяется на одинаковые по форме зоны и с помощью закона статистической радиофизики определяются их допустимые размеры и расстояния до других зон, в пределах которых выполняются условия допустимого взаимного влияния. При этом интервал между зонами, в которых используются одинаковые рабочие каналы, обычно получается больше требуемого для поддержания взаимных помех на допустимом уровне.

Более приемлем второй способ деления на зоны. В этом случае тщательно измеряют или рассчитывают параметры системы для определения минимального числа БС, обеспечивающих удовлетворительное обслуживание абонентов по всей территории, определяют оптимальное место расположения БС с учетом рельефа местности, рассматривают возможность использования направленных антенн, пассивных ретрансляторов и смежных центральных станций в момент пиковой нагрузки и т. д.

Каждая из сот обслуживается своим передатчиком с невысокой выходной мощностью и ограниченным числом каналов связи. Это позволяет без помех использовать повторно частоты каналов этого передатчика в другой, удаленной на значительное расстояние соте. Теоретически такие передатчики можно использовать и в соседних сотах.

Но на практике зоны обслуживания сот могут перекрываться под действием различных факторов, например, вследствие изменения условий распространения радиоволн. Поэтому в соседних сотах используются различные частоты.

Сотовая топология позволяет увеличивать абонентскую емкость системы и охватить сколь угодно большую зону обслуживания без ухудшения качества связи и расширения выделенного частотного диапазона.

Разработка топологии системы сотовой мобильной связи (ССС) является своеобразной и достаточно сложной задачей, и на одном из этапов проводится *частотно-территориальное планирование*.

БС, на которых допускается повторное использование выделенного набора частот, удалены друг от друга на расстояние D , называемое «защитным интервалом». Именно возможность повторного применения одних и тех же частот определяет высокую эффективность использования частотного спектра в ССС.

Смежные БС, использующие различные наборы частотных каналов, образуют группу из C станций. Если каждой базовой станции выделяется набор из n каналов с шириной полосы каждого E , то общая ширина полосы, занимаемая ССС, составит

$$\Delta F_c = E \cdot n \cdot C.$$

Таким образом, величина C определяет минимально возможное число каналов в системе, поэтому ее часто называют частотным параметром системы, или *коэффициентом повторения частот*. Коэффициент C не зависит от числа каналов в наборе и увеличивается по мере уменьшения радиуса соты. Таким образом, при использовании сот меньших радиусов имеется возможность увеличения повторяемости частот.

Любой из каналов сотовой связи представляет собой пару частот для *дуплексной связи*, т. е. частоты БС и МС *разнесены*. Это делается для того, чтобы улучшить фильтрацию сигналов и исключить взаимное влияние передатчика на приемник одного и того же устройства при их одновременной работе.

Несмотря на разнообразие стандартов сотовой связи, алгоритмы их функционирования, независимо от имеющихся особенностей, в основном сходны.

Иногда возникает ситуация, когда поток заявок на обслуживание, поступающий от абонентов сотовой сети, превышает количество каналов, имеющих на всех близко расположенных базовых станциях. Это происходит тогда, когда все каналы станций заняты обслуживанием абонентов и нет ни одного свободного, и поступает очередная заявка на обслуживание от мобильного абонента. В этом случае, как временная мера (до освобождения одного из каналов) используется принцип эстафетной передачи внутри соты. При этом происходит поочередное переключение каналов в пределах одной и той же базовой станции для обеспечения связью всех абонентов.

Одна из важных услуг сети сотовой связи – предоставление *роуминга* (от англ. roam – скитаться, блуждать). Для организации

роуминга сотовые сети должны быть одного стандарта, а ЦК этого стандарта должны быть соединены специальными каналами связи для обмена данными о местонахождении абонента.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего служит «защитный интервал» при планировании сотовых сетей связи?
2. Что характеризует коэффициент уменьшения соканальных помех?
3. Для чего производится секторизация сот?
4. За счет чего можно увеличить количество обслуживаемых абонентов?
5. Что такое «пикосота»?
6. Какими двумя способами можно разделить обслуживаемую территорию на соты?
7. В чем суть частотно-территориального планирования?
8. Что называется «защитным интервалом»?
9. Когда возникает «эстафетная передача» внутри соты?
10. Как организуется роуминг?

2.3. Элементы сети GSM

2.3.1. Мобильная станция

Обобщенная блок-схема цифровой МС приведена на рис. 16.

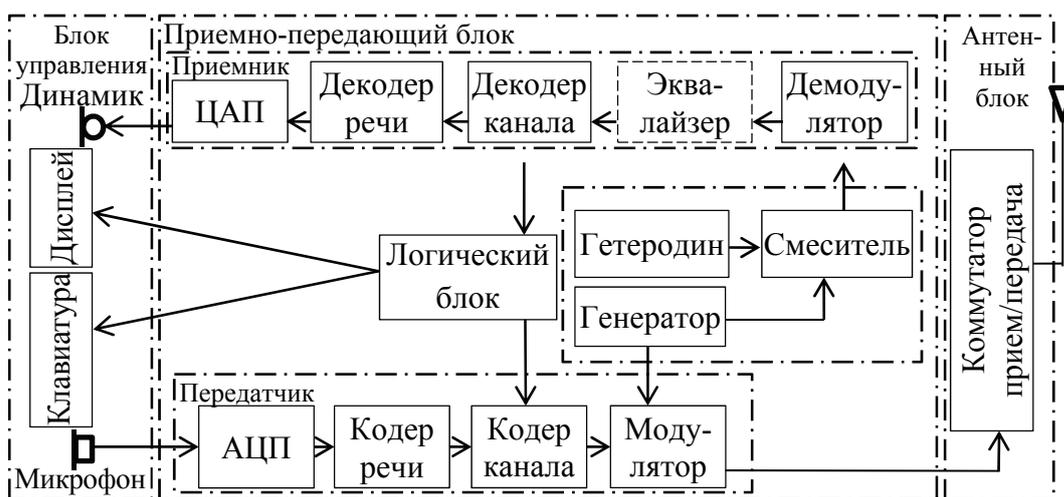


Рис. 16. Блок-схема цифровой мобильной станции

В ее состав входят: блок управления, приемопередающий блок, антенный блок.

Блок управления включает в себя *микротелефонную трубку (микрофон и динамик), клавиатуру и дисплей*. Приемопередающий блок состоит из *передатчика, приемника, синтезатора частот и логического блока*.

В состав передатчика входят:

– *АЦП (аналогово-цифровой преобразователь)* – преобразует в цифровую форму сигнал с выхода микрофона, и вся последующая обработка и передача сигнала речи производится в цифровой форме;

– *кодер речи* – осуществляет кодирование сигнала речи, т. е. преобразование сигнала, имеющего цифровую форму, по определенным законам с целью сокращения его избыточности;

– *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 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 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; *ЦАП* – преобразует принятый цифровой 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 функционально необходимым и в некоторых случаях может отсутствовать.

Логический блок – это микрокомпьютер, осуществляющий управление работой ПС.

Синтезатор является источником колебаний несущей частоты, используемой для передачи информации по радиоканалу. Наличие *гетеродина* и *преобразователя частоты (генератора)* обусловлено тем, что для передачи и приема используются различные участки спектра (дуплексное разделение по частоте).

Антенный блок включает в себя *антенну* и *коммутатор прием/передача*.

Блок-схема МС (рис. 7) является упрощенной. На ней не показаны усилители, 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 МС включают соответственно *блоки шифратора и дешифратора* сообщений.

В МС предусмотрен специальный съемный модуль идентификации абонента – SIM-карта. Каждая МС имеет свой МИН – международный идентификационный номер (IMSI), записанный в ее памяти. Каждой МС присваивается еще один МИН – IMEI, который используется для исключения доступа к сетям с помощью похищенной станции или станции, не обладающей такими полномочиями.

МС включает также *детектор речевой активности*, который с целью экономного расходования энергии источника питания, а также снижения уровня помех, создаваемых для других станций при работающем передатчике, включает работу передатчика на излучение только на те интервалы времени, когда абонент говорит. В необходимых случаях в МС могут входить отдельные терминальные устройства, например, факсимильный аппарат, в том числе подключаемые через специальные адаптеры с использованием соответствующих интерфейсов.

2.3.2. Базовая станция

Особенностью современных БС является использование разнонаправленного приема, для чего станция должна иметь две приемные антенны. Кроме того, БС может иметь отдельные антенны на передачу и на прием (рис. 17).

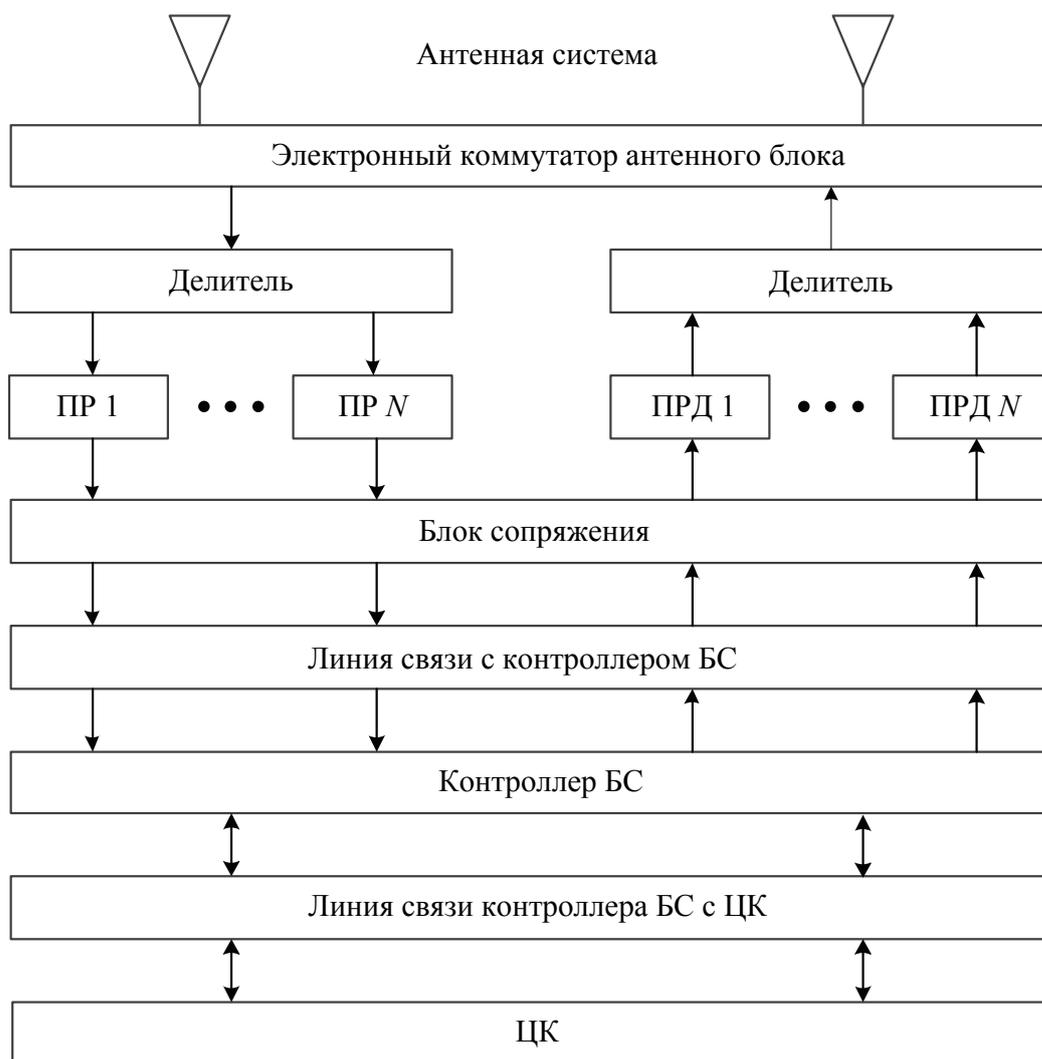


Рис. 17. Обобщенная структура построения базовой станции

Другая 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, обеспечивающие их согласованную перестройку при переходе с одного канала на другой; конкретное число N приемопередатчиков зависит от конструкции и комплектации БС. 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 ту же структуру, что и в МС, за исключением того, что в них отсутствуют 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 (ЦК), а не в составе приемопередатчиков БС, хотя функционально они остаются элементами приемопередатчиков.

Контроллер БС обеспечивает управление работой станции, а также контроль работоспособности всех входящих в нее блоков и узлов. Один контроллер может управлять несколькими станциями. Он выполняет следующие функции: управление распределением радиоканалов, контроль соединения и регулировку их очередности; обеспечение режима работы с «прыгающей» частотой, модуляцию и демодуляцию сигналов, кодирование и декодирование сообщений, кодирование речи, адаптацию скорости передачи речи, данных и сигналов вызова; управление очередностью передачи сообщений персонального вызова.

На линии между БС и ЦК расположены еще два узла. Блок сопряжения с линией связи осуществляет упаковку информации, передаваемой по линии связи на ЦК, и распаковку принимаемой от него информации. Для связи БС с ЦК обычно используется радиорелейная или волоконно-оптическая линия, если они не располагаются территориально в одном месте.

Транскодер обеспечивает преобразование выходных сигналов канала передачи речи и данных ЦК (64 кбит/с) к виду, соответствующему рекомендациям GSM по радиоинтерфейсу (13 кбит/с). Транскодер обычно располагается вместе с ЦК.

Для обеспечения надежности многие блоки и узлы БС резервируются (дублируются), в состав станции включаются автономные источники бесперебойного питания (аккумуляторы).

2.3.3. Центр коммутации

Центр коммутации подвижной связи (ЦК) – это автоматическая телефонная станция, обеспечивающая все функции управления сетью. ЦК осуществляет постоянное слежение за МС, организует их эстафетную передачу, в процессе которой достигается непрерывность связи при перемещении МС из соты в соту и переключение рабочих каналов в соте при появлении помех или неисправностей.

На ЦК замыкаются потоки информации со всех БС, и через него осуществляется выход на другие сети связи – стационарную телефонную сеть, сети междугородной связи, спутниковой связи, другие сотовые сети. В состав ЦК входит несколько контроллеров. Каждый ЦК обслуживает абонентов, расположенных в пределах определенной географической зоны, и управляет процедурами установления вызова и маршрутизации. Также ЦК формирует данные для тарификации разговоров, составляет статистические данные, поддерживает процедуры безопасности при доступе к радиоканалу.

Схема блоков центра коммутации представлена на рис. 18. Коммутатор подключается к линиям связи через соответствующие *контроллеры* связи, осуществляющие промежуточную обработку (упаковку/распаковку, буферное хранение) потоков информации. Управление работой ЦК и системы в целом производится от центрального контроллера. Работа ЦК предполагает участие операторов, поэтому в состав центра входят соответствующие терминалы, а также средства отображения и 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.

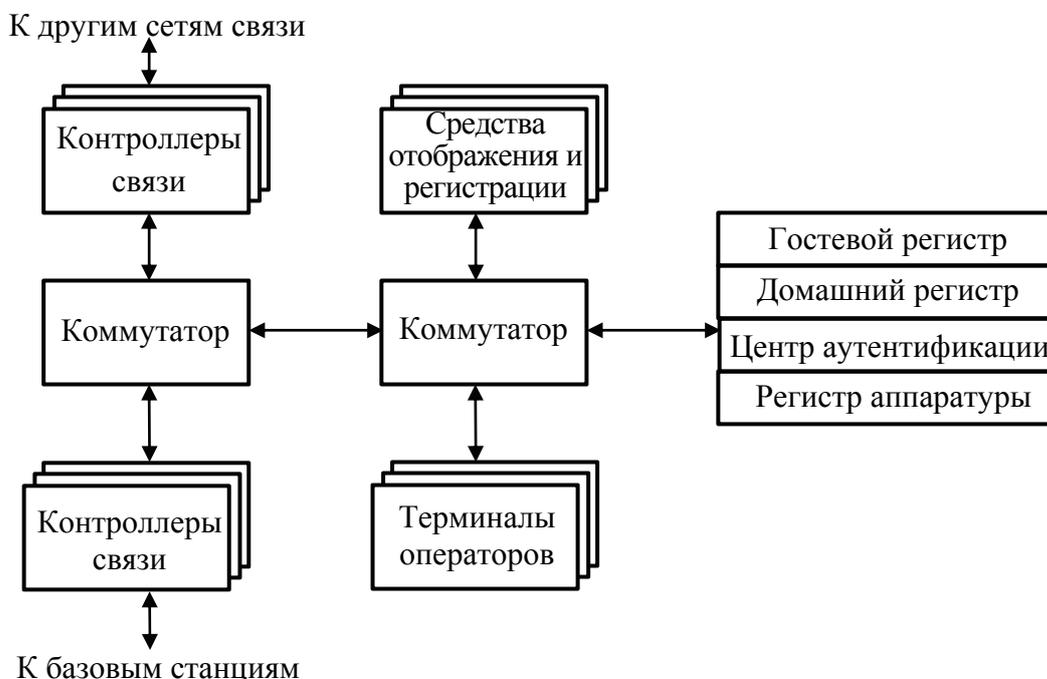


Рис. 18. Состав функциональных элементов ЦК

Оборудование подсистемы коммутации включает регистр положения (домашний регистр, ДР), регистр перемещения (гостевой регистр, ГР), центр аутентификации (ЦАУ) и регистр идентификации оборудования (РИО).

ЦК осуществляет постоянное слежение за МС, используя регистры положения и перемещения.

Домашний регистр является справочной базой данных (БД) о постоянно зарегистрированных в сети абонентах. В ней содержатся опознавательные адреса и номера, а также параметры подлинности абонентов, состав услуг связи, информация о маршрутизации, данные о роуминге абонента (включая данные о временном идентификационном номере абонента и соответствующем ГР).

К данным, находящимся в ДР, имеют доступ все ЦК и ГР сети. К ним также могут получать доступ ЦК и ГР, относящиеся к другим сетям, с целью обеспечения межсетевого роуминга.

В *гостевом регистре* хранится та часть информации о местоположении какой-либо МС, которая позволяет ЦК доставить вызов. ГР содержит сведения об абонентах, зарегистрированных в другой системе, но пользующихся в настоящее время услугами сотовой связи в данной системе. Также ГР контролирует передвижение МС из соты в соту. С его помощью достигается функционирование МС за пределами контролируемой ДР зоны. Когда в процессе перемещения МС переходит из зоны действия одного КБС в зону действия другого, то она регистрируется последним, т. е. в ГР заносится новая информация.

Этот регистр содержит международный идентификационный номер мобильного абонента (IMSI), который используется для опознавания МС в центре аутентификации, а также данные, необходимые для нормальной работы сети GSM.

В целом ГР представляет собой локальную БД об абоненте для той зоны, где он находится, что позволяет исключить постоянные запросы в ДР и сократить время на обслуживание вызовов.

Центр аутентификации обеспечивает процедуры аутентификации абонентов и шифрования сообщений. Он состоит из нескольких блоков и формирует ключи и алгоритмы аутентификации. С его помощью проверяются полномочия абонента и осуществляется его доступ к сети. ЦАУ принимает решения о параметрах процесса аутентификации и определяет ключи шифрования на основе БД, находящейся в РИО.

Каждый мобильный абонент на время пользования ССС получает стандартный модуль подлинности абонента (SIM-карту), который содержит: международный идентификационный номер абонента (IMSI), свой индивидуальный ключ аутентификации (Ki), алгоритм аутентификации (A3). С помощью информации, записанной в SIM-карте, в результате обмена данными между МС и сетью осуществляется полный цикл аутентификации и разрешается доступ абонента к сети.

Регистр идентификации оборудования содержит сведения об эксплуатируемых МС 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. РИО содержит централизованную БД для подтверждения подлинности международного идентификационного номера оборудования мобильной станции (IMEI).

Как и в БС, в ЦК предусматривается резервирование основных элементов аппаратуры, включая источник питания, процессоры и базы данных. БД часто не входят в состав ЦК, а реализуются в виде отдельных элементов. Устройство ЦК может быть различным в исполнении разных компаний-изготовителей.

Центр управления и обслуживания обеспечивает управление элементами сети и качеством ее работы. В функции этого центра входит: регистрация и обработка аварийных сигналов, устранение неисправностей, проверка состояния оборудования сети и прохождения вызова МС, управление трафиком, сбор статистических данных, управление ПО и БД и др.

Центр управления сетью обеспечивает техническое обслуживание и эксплуатацию на уровне всей сети.

В функции этого центра входит: управление трафиком, диспетчерское управление сетью в аварийных ситуациях, контроль состояния устройств автоматического управления в оборудовании сети, отображение состояния всей сети на дисплее операторов, управление маршрутами сигнализации и соединениями между узлами, контроль соединений между GSM и другими сетями и др.

2.3.4. Интерфейсы

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

Предусмотрены свои интерфейсы для связи МС с БС, БС – с ЦК, БС – с КБС, ЦК – с ДР, ГР, РИО, стационарной телефонной сетью и другие.

Все интерфейсы подлежат стандартизации для обеспечения совместимости аппаратуры разных фирм-изготовителей, что не исключает возможности использования различных интерфейсов, определяемых разными стандартами, для одного и того же информационного стыка. В некоторых случаях применяются уже существующие стандартные интерфейсы, например, соответствующие протоколам обмена в цифровых информационных сетях.

Интерфейс обмена между МС и БС носит название эфирного интерфейса или радиоинтерфейса. Эфирный интерфейс обязательно используется в любой ССС при любой ее конфигурации и в единственном возможном для своего стандарта сотовой связи варианте. Данное обстоятельство позволяет МС любой фирмы-изготовителя успешно работать совместно с БС той же или любой другой фирмы, что удобно для компаний-операторов и необходимо для организации роуминга. Стандарты эфирного интерфейса разрабатываются весьма тщательно, чтобы обеспечить возможно более эффективное использование полосы частот, выделенной для канала радиосвязи. Именно радиоинтерфейс обеспечивает каналы связи для множественного доступа.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких блоков состоит мобильная станция?
2. Для чего предназначен кодер речи?
3. Какие функции кодера канала?
4. Какое назначение эквалайзера?
5. Каковы принципы работы детектора речевой активности?
6. Перечислите основные узлы базовой станции.
7. Как организуется разнесенный прием на базовой станции?
8. Для чего предназначен контроллер базовой станции?
9. Каково назначение транскодера?
10. Перечислите функции центра коммутации.
11. Какие сведения содержит регистр положения?
12. Для чего предназначен регистр перемещения?
13. Каковы функции центра аутентификации?
14. Какая информация хранится в регистре идентификации оборудования?
15. Для чего предназначены интерфейсы сотовой связи?

2.4. Физические и логические каналы в GSM

Физические каналы создаются с применением оборудования и физических переносчиков информации. А передаваемая ими информация – это логические каналы.

Для разных логических каналов при разных фазах и состояниях соединения применяются разные форматы пакетов.

В системе GSM определены две основные группы логических каналов – каналы информационного обмена и каналы управления.

Каналы информационного обмена (ТСН). Каналы ТСН используются системой GSM для передачи пользовательских данных (например, речи и факсимильных сообщений). Они разделены на два основных класса – *полноскоростные* (ТСН/F) и *полускоростные* (ТСН/H) каналы. Каналы ТСН/F характеризуются пропускной способностью 22,8 Кбит/с, а для каналов ТСН/H эта величина составляет лишь 11,4 Кбит/с.

Каналы управления (ССН). В системе GSM для контроля доступа к среде распределения каналов информационного обмена и управления мобильностью используется много различных каналов ССН. Определено три группы каналов управления, причем каждая из них, в свою очередь, тоже разделяется на подгруппы.

Широковещательный канал управления (BCCH). БС использует этот канал для передачи данных всем мобильным станциям, находящимся в ячейке.

Общий канал управления (CCCH). Через канал СССН осуществляется обмен информацией при установке соединения между МС и БС. Для поиска МС при звонках на нее БС использует *поисковый канал (PCH)*. Если же соединение устанавливает МС, она посылает данные на БС через *канал произвольного доступа (RACH)*. Через *канал предоставления доступа (AGCH)* БС сообщает МС, что для дальнейшей установки соединения можно использовать канал ТСН или SDCCH.

Выделенный канал управления (DCCH). В то время как все рассмотренные выше каналы были однонаправленными, следующие каналы являются *двунаправленными*. Если МС не удалось установить соединение ТСН с БС, она использует для передачи сигналов *автономный выделенный канал управления (SDCCH)* с

низкой пропускной способностью (782 бит/с). Сигналы могут включать аутентификацию, регистрацию или другие данные, необходимые для установки соединения ТСН. С каждым каналом ТСН и SDCCH связан *медленный ассоциированный выделенный канал управления* (SACCH). Через него осуществляется обмен информацией о системе, в частности, передача данных о качестве канала и уровне мощности сигнала. Когда же нужно передать большее количество сигнальной информации, а канал ТСН уже существует, устанавливается *быстрый ассоциированный выделенный канал управления* (FACCH). Канал FACCH использует временные интервалы, которые в ином случае относились бы к каналу ТСН. Он необходим, например, при переключениях, когда БС должна обмениваться с МС большим количеством данных за меньший промежуток времени.

Приведенные логические каналы не могут использовать временные интервалы произвольным образом. В системе GSM применяется довольно сложная схема уплотнения, объединяющая несколько иерархий кадров.

Типичная схема использования физического канала для передачи данных представлена на рис. 19. За двенадцатью интервалами пользовательских данных следует интервал передачи сигналов. Далее опять идут 12 интервалов с пользовательскими данными, а затем следует свободный интервал. Эта схема из 26 интервалов повторяется раз за разом. В описанном случае канал ТСН/F занимает лишь 24 из 26 интервалов.

TTTTTTTTTTTTSTTTTTTTTTTTx
TTTTTTTTTTTTSTTTTTTTTTTTx

Рис. 19. Структура мультикадров
для ассоциированных каналов

Здесь T обозначает пользовательскую передачу в канале ТСН/F, а S – передачу сигналов в канале SACCH.

Поскольку нормальный пакет переносит 114 бит пользовательских данных и повторяется каждые 4,615 мс, то это дает пропускную способность 24,7 Кбит/с:

$$\frac{114 \text{ бит}}{4,615 \text{ мс}} = 24,702 \text{ Кбит/с} .$$

Отсюда следует, что канал SACCH характеризуется пропускной способностью 950 бит/с:

$$\frac{24,7 \text{ Кбит/с}}{26} = 950 \text{ бит/с}.$$

Поскольку канал TCH/F использует 24 из 26 интервалов, окончательная скорость передачи составляет 22,8 Кбит/с, что является нормой для канала TCH/F:

$$24,7 \text{ Кбит/с} - (0,95 \text{ Кбит/с} \cdot 2) = 22,8 \text{ Кбит/с}.$$

Эта периодическая схема из 26 интервалов встречается во всех кадрах TDMA каналов TCH. Комбинация таких кадров называется *мультикадром информационного обмена*. Этот тип мультикадров используется в каналах TCH, SACCH и FACCH.

Вопросы для самопроверки

1. Как Вы представляете физические каналы передачи радиосигналов?
2. Что такое «логические каналы» в GSM?
3. Каковы два основных класса каналов информационного обмена?
4. Для чего предназначены каналы управления? Какие виды каналов управления существуют в GSM?
5. Что такое мультикадр информационного обмена?

2.5. Процедуры обработки радиосигналов

2.5.1. Обработка сигналов в стандарте GSM

На рис. 20 показаны виды обработки речевых сигналов при передаче между МС и БС, с указанием характерных скоростей в точках обработки.

На рисунке присутствуют следующие блоки (этапы) обработки речевого сигнала в тракте передачи МС:

- аналого-цифровое преобразование сигнала от микрофона;
- сегментация, т. е. разделение цифрового потока на сегменты по 20 мс;
- речевое кодирование, предназначенное для сжатия цифровых данных;
- канальное помехоустойчивое кодирование;

- шифрование, т. е. криптозащита цифровых потоков;
- перемежение битов для борьбы с замираниями в радиоканале;
- форматирование пакетов, т. е. сопровождение информационных битов служебными, разделительными, защитными, тренировочными и другими битами.

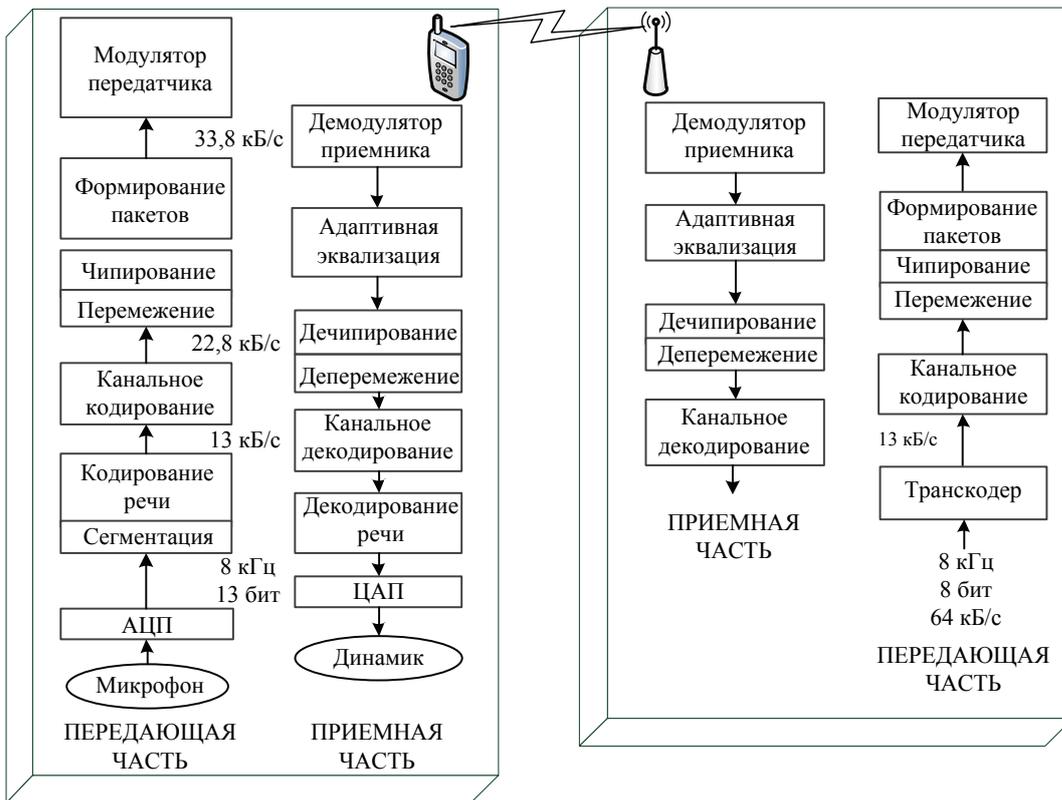


Рис. 20. Схема обработки речевого сигнала в GSM

В тракте приема МС все процедуры взаимнообратны процедурам на передаче, кроме одной: адаптивного выравнивания, понимаемого как квазиоптимальный прием битов в условиях взаимных наложений из-за многолучевости.

В трактах приемопередачи БС процедуры обработки аналогичны МС и начинаются с этапа канального кодирования. Специфичен лишь блок транскодер, предназначенный для преобразования информационного потока 64 кБ/с во внутренний формат GSM 13 кБ/с.

При передаче неречевой информации (факсограммы, SMS, иные цифровые данные) цифровые сигналы вводятся в тракт либо перед канальным кодером, либо после него, если помехоустойчивое канальное кодирование выполняется самим источником данных.

Рассмотрим подробнее АЦП, сегментацию и речевое кодирование.

Сигнал в полосе передачи преобразуется в дискретный с частотой 8 кГц и затем квантуется с разрядностью 13 бит на отсчет. Таким образом, имеем цифровой поток со скоростью

$$8 \text{ кГц} \cdot 13 \text{ бит} = 104 \text{ Кбит/с.}$$

Для сжатия потока с 104 Кбит/с до 13 Кбит/с используется метод линейного предиктивного кодирования с регулярным импульсным возбуждением. В его основе лежит представление, что голосовой тракт человека – фильтр с переменными параметрами, на который воздействует сигнал основного тона для формирования гласных звуков, или шум для формирования «согласных», шипящих звуков. Для кодирования речи необходимо сохранить информацию об основном тоне и меняющихся во времени параметрах фильтра (коэффициентах). Звуки речи имеют длительность от 5 мс до 300 мс (т. е. коэффициенты фильтра не меняются в эти интервалы, они стационарны).

В GSM интервал сегментации (стационарности) выбран 20 мс. На нем производится вычисление коэффициентов фильтра и параметров основного тона из 160 отсчетов от А/D. Таким образом, информация о речевом сигнале обновляется 50 раз в секунду.

В случае, если абонент молчит, это обнаруживается с помощью детектора активности речи. При этом соответствующие 20 мс сегменты маркируются как пустые, чтобы их могли занимать, например, сигналы GPRS.

Способ *кодирования*, принятый в GSM, обеспечивает сжатие исходного объема бит на 20 мс интервале от значения

$$(160 \text{ отсчетов} \cdot 13 \text{ бит/отсчет}) = 2080 \text{ бит}$$

до значения 260 бит!

Таким образом, за секунду имеем

$$50 \cdot 260 \text{ бит} = 13 \text{ Кбит/с.}$$

Кроме указанной скорости, называемой *«полная скорость»*, в GSM используют *расширенную полную скорость* – 15,1 Кбит/с, и *половинную скорость* – 5,6 Кбит/с.

2.5.2. Канальное кодирование

На основе 260 бит за сегмент 20 мс от кодера речи кодер канала формирует 456 бит закодированной информации с внесенной избыточностью. Схема кодирования показана на рис. 21.

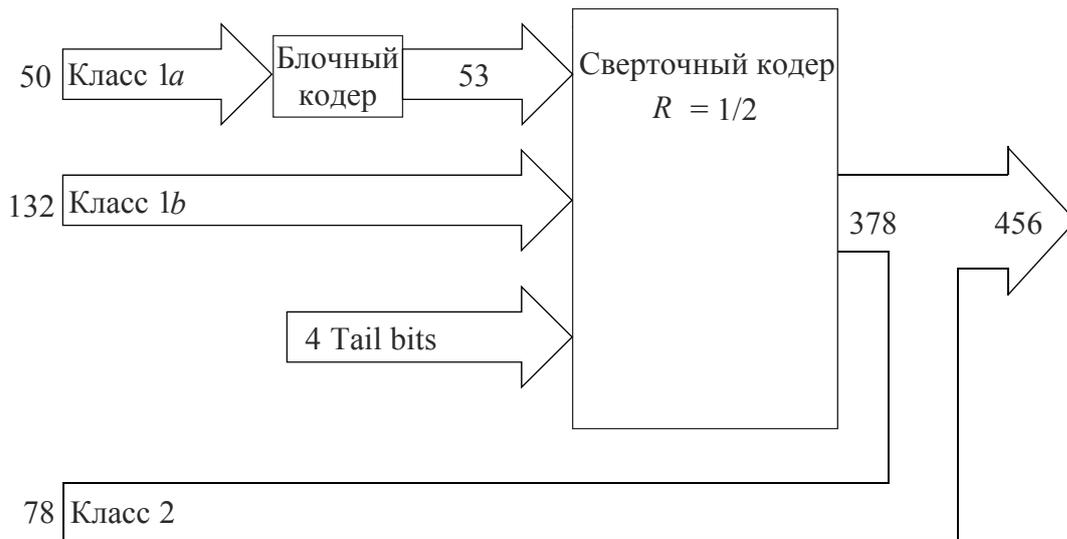


Рис. 21. Схема канального кодирования в GSM

Входные биты разделяются на три блока по степени важности:

- класс $1a$ (50 бит) – очень важные биты;
- класс $1b$ (132 бита) – важные биты;
- класс 2 (78 бит) – не так важные биты.

Биты класса $1a$ проходят дополнительный блочный кодер, увеличивающий их объем до 53 бит. Далее эти биты, биты класса $1b$ и 4 вспомогательных разделительных бита подаются на сверточный кодер, вдвое увеличивающий объем битов до 378. К результату добавляются 78 битов класса 2. В результате на выходе канального кодера каждые 20 мс формируется 456 бит. Таким образом, образуют поток со скоростью

$$\frac{456 \text{ бит}}{20 \text{ мс}} = 22,8 \text{ Кбит/с}.$$

2.5.3. Шифрование

Назначение шифрования – закодировать пакет (burst) так, чтобы он был «непонятен» любому другому прибору, кроме оговоренного приемника. Алгоритм шифрования в GSM называется $A5$. Этот алгоритм не добавляет биты к пакету из 456 бит каждые 20 мс, т. е. сохраняет его размер. Ключ шифрования K_c формируется алгоритмом $A8$. Рис. 22, 23 поясняют алгоритм и процедуру шифрования.

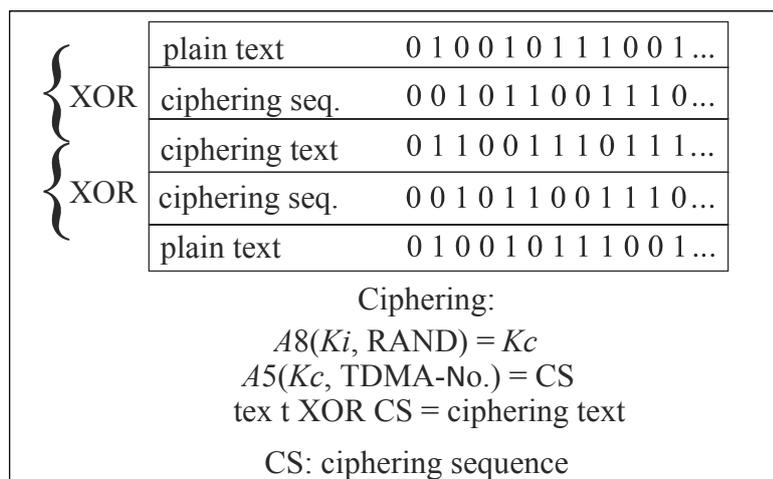


Рис. 22. Шаги алгоритма шифрования

В центре аутентификации AC вырабатывается случайный код RAND, который применяет алгоритм A8 для формирования ключа шифрования.

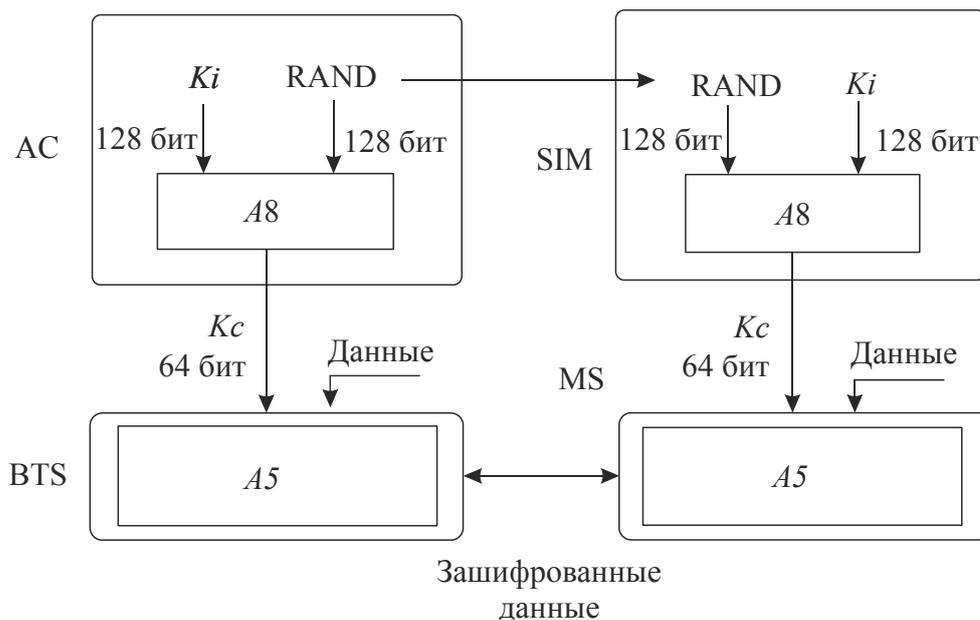


Рис. 23. Схема процедуры шифрования

2.5.4. Передача кадров

Временная и частотная структура сигнала GSM приведена на рис. 24. В каждом частотном канале в течение кадра передаются поочередно сигналы восьми абонентов, то есть используется и частотное, и временное разделение каналов.

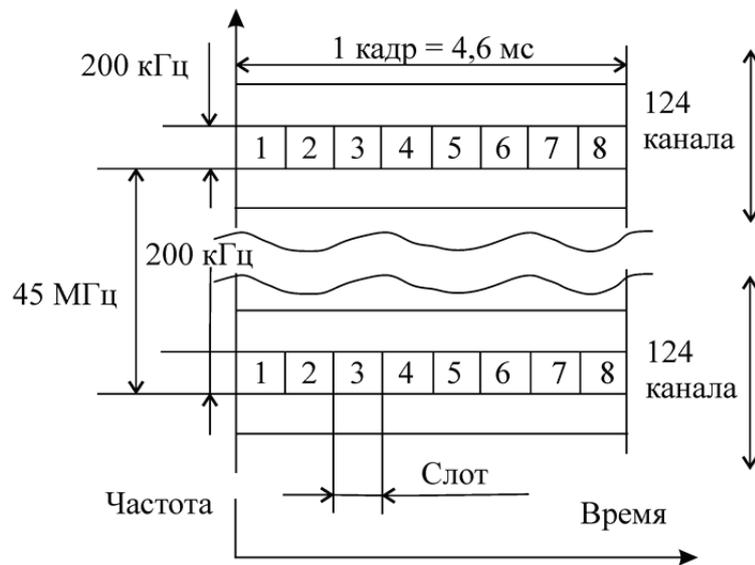


Рис. 24. Временная и частотная структура сигнала GSM

Структура канального интервала стандарта GSM приведена на рис 25.

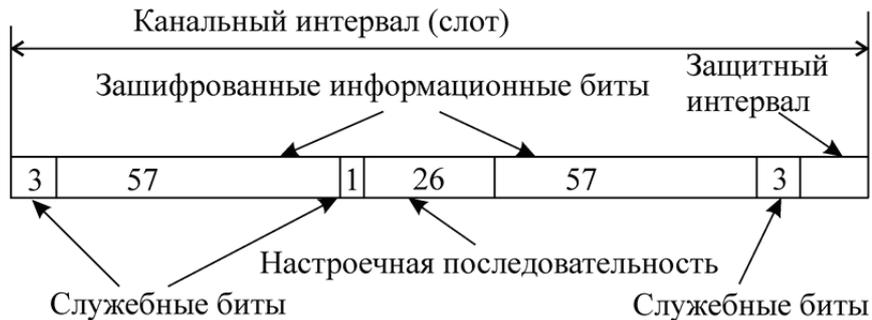


Рис. 25. Структура канального интервала стандарта GSM

Зашифрованные информационные биты передаются двумя порциями по 57 бит. Настроечная последовательность (известная комбинация битов, разная для каждой ячейки) используется для настройки параметров приемника по получаемому сигналу. В каждом канальном интервале передаются служебные сигналы (синхронизации, управления и т. п.), предусмотрены защитные биты, предохраняющие проникновение сигналов соседних каналов.

Поскольку для борьбы с замираниями в системе GSM используют медленные скачки частоты, то сообщение, передаваемое абоненту в выделенном временном интервале, в каждом кадре передается на другой частоте. После окончания передачи кадра все узлы сети обязаны выдержать технологическую паузу в 9,6 мкс. Эта пауза,

называемая также межкадровым интервалом, нужна для приведения сетевых адаптеров в исходное состояние, а также для предотвращения монопольного захвата среды одной станцией. После окончания технологической паузы узлы имеют право начать передачу своего кадра, т. к. среда свободна.

2.5.5. Перемежение блоков

В GSM перемежение (перепутывание) служит для устранения длинных пакетов ошибок при замираниях сигнала. Перемежение включает два уровня:

1 уровень – массив из 456 бит разбивается на 8 кадров по 57 битов в каждом (рис. 26).

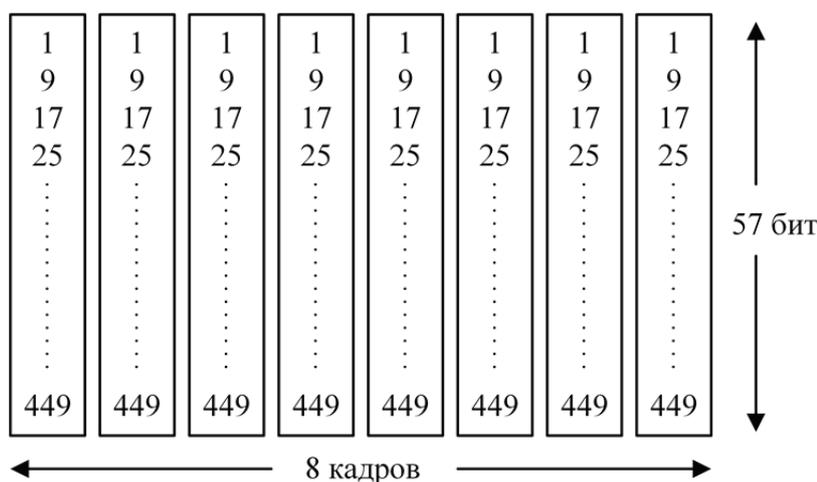


Рис. 26. Первый этап перемежения блоков

Из полученных кадров строится пакет нормального типа (Normalburst, NB), как показано на рис. 27. NB состоит из:

3 + 3 бита – флаги;

1 + 1 бита – разделители полей;

57 + 57 битов – информация;

26 битов – тренировочная последовательность.

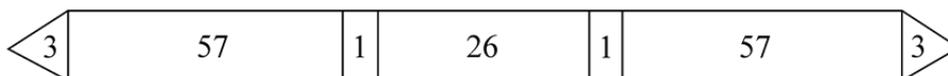


Рис. 27. Формирование нормального пакета NB

При потере одного NB на сегменте 20 мс теряется 25% информации речи, т. к. их четыре штуки на этом интервале.

2 уровень – уменьшаются потери на один пакет вдвое, т. е. до 12,5% по схеме, показанной на рис. 28.

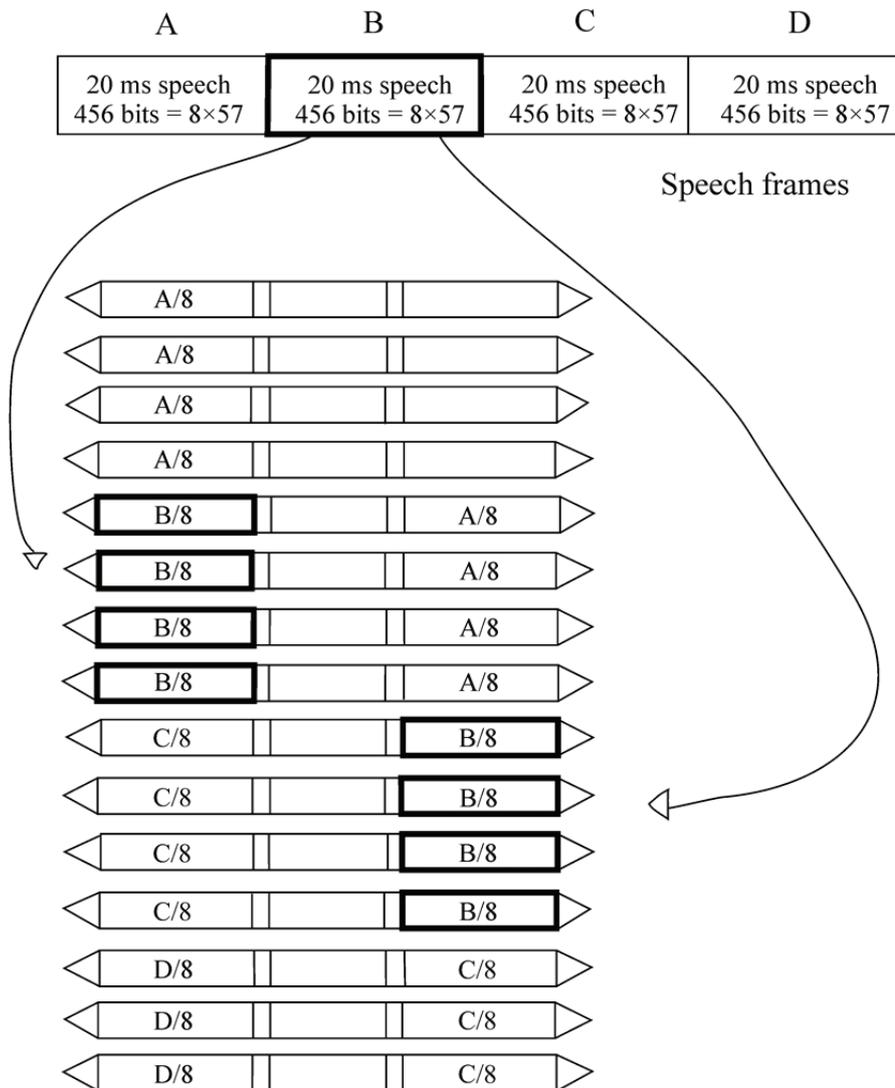


Рис. 28. Второй этап перемежения блоков

Видно, что система перемежения имеет задержку в 20 мс для полной сборки сегмента.

2.5.6. Форматирование пакетов

Под форматированием пакетов понимают процесс добавления в них бит флагов и других бит, получение необходимой длины во времени с учетом защитных интервалов.

При форматировании пакетов на интервале 20 мс к исходным 456 битам добавляется

$$(3 + 3 + 1 + 1 + 26) \cdot 4 = 136 \text{ бит.}$$

Таким образом, уже имеем $136 + 456 = 592$ бита.

Каждый временной слот кадра TDMA имеет длительность 0,577 мс. При длительности каждого бита 3,69 мкс на таком интервале вмещается

$$\frac{0,577}{3,69} = 156,25 \text{ бит.}$$

Длина одного burst составляет 148 бит:

$$156,25 - 148 = 8,25 \text{ бит,}$$

где 8,25 бит – Guard Period (GP).

Защитный период GP компенсирует возможные сдвиги пакетов по длине слота. Время GP используется для организации включения/отключения батареи питания, когда передаются во времени «чужие» слоты.

Итак, за 20 мс будем иметь

$$592 + (8,25 \cdot 4) = 625 \text{ бит.}$$

Кроме того, для последующего регулирования модулятора добавляются «холостые» биты с обеих сторон пакетов в количестве 51 бита. В результате получаем полный формат пакета длиной

$$625 + 51 = 676 \text{ бит каждые 20 мс.}$$

Это эквивалентно скорости

$$\frac{676 \text{ бит}}{20 \text{ мс}} = 33,8 \text{ Кбит/сот одного абонента.}$$

С учетом восьми абонентов в кадре TDMA получаем скорость передачи на одной частоте:

$$8 \cdot 33,8 \text{ Кбит/с} = 270,4 \text{ Кбит/с.}$$

2.5.7. Кадры TDMA

При формировании кадров TDMA использована ступенчатая иерархическая схема (рис. 29). В схеме присутствуют:

- а) слот (timeslot);
- б) кадр TDMA из 8 слотов;
- в) мультикадр TDMA (26 или 51 кадров TDMA);
- г) суперкадр TDMA (1326 кадров TDMA, т. е. 51 26-элементных мультикадров, или 26 51-элементных мультикадров);
- д) гиперкадр TDMA (2048 суперкадров или 2 715 648 кадров).

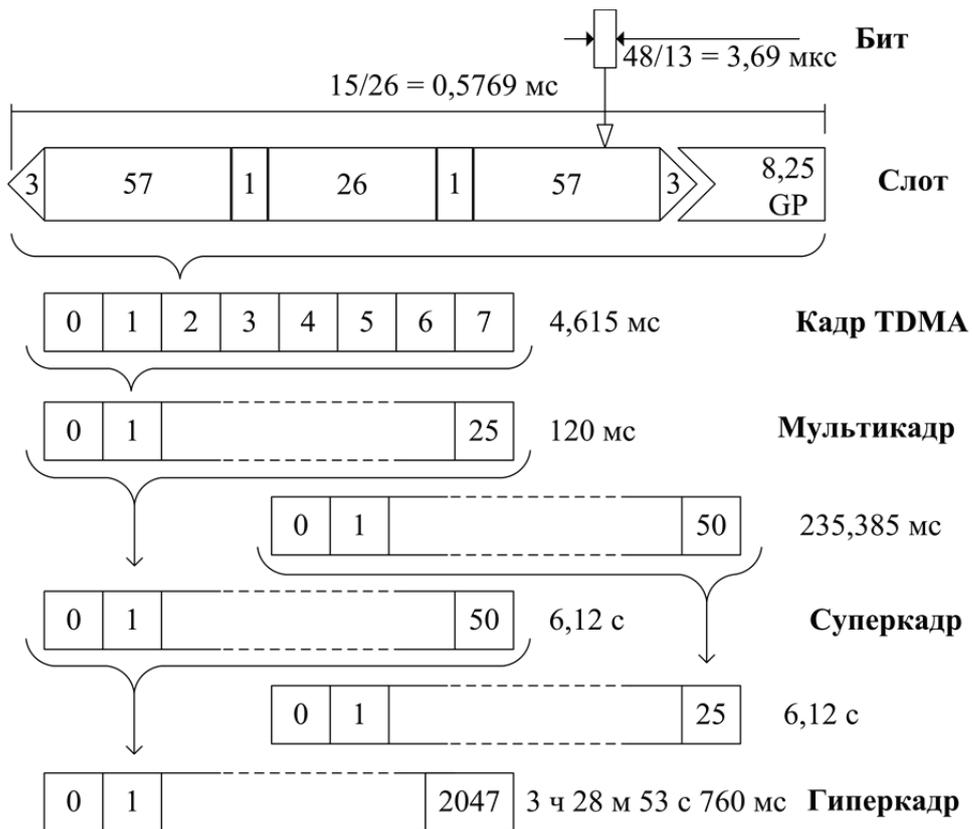


Рис. 29. Кадры TDMA

Длительность гиперкадра равна

$$3 \text{ ч } 28 \text{ мин } 53 \text{ с } 760 \text{ мс} = 12 \text{ 533,76 с.}$$

Столь большой гиперкадр обусловлен алгоритмами шифрования информации. Именно гиперкадру равен период псевдослучайного алгоритма (последовательности) шифрования.

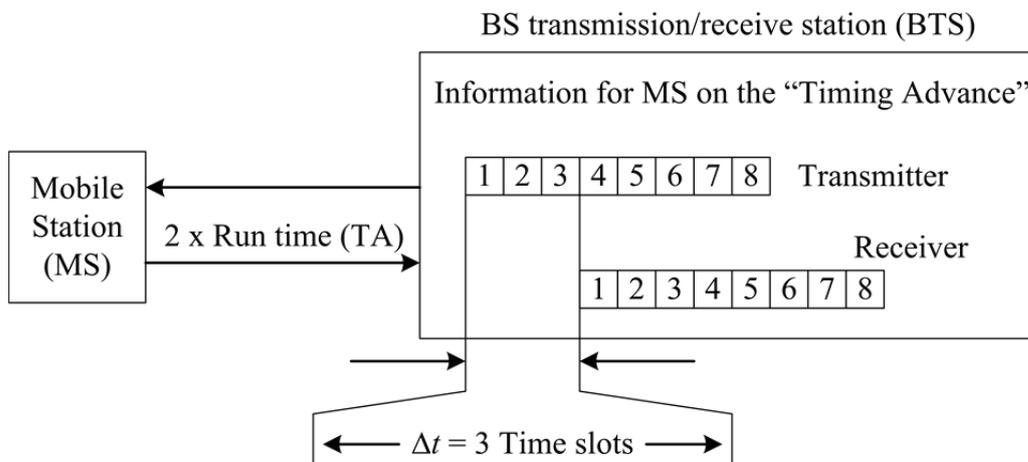


Рис. 30. Временная задержка кадров передачи и приема

Кадры на передачу и на прием имеют взаимную задержку на три слота, что иллюстрирует рис. 30.

2.5.8. Перескоки частоты

Для борьбы с частотно-селективными замираниями, помехами и для повышения криптозащищенности радиопередачи применяется изменение частоты передачи абонентского сообщения от кадра к кадру TDMA (рис. 31).

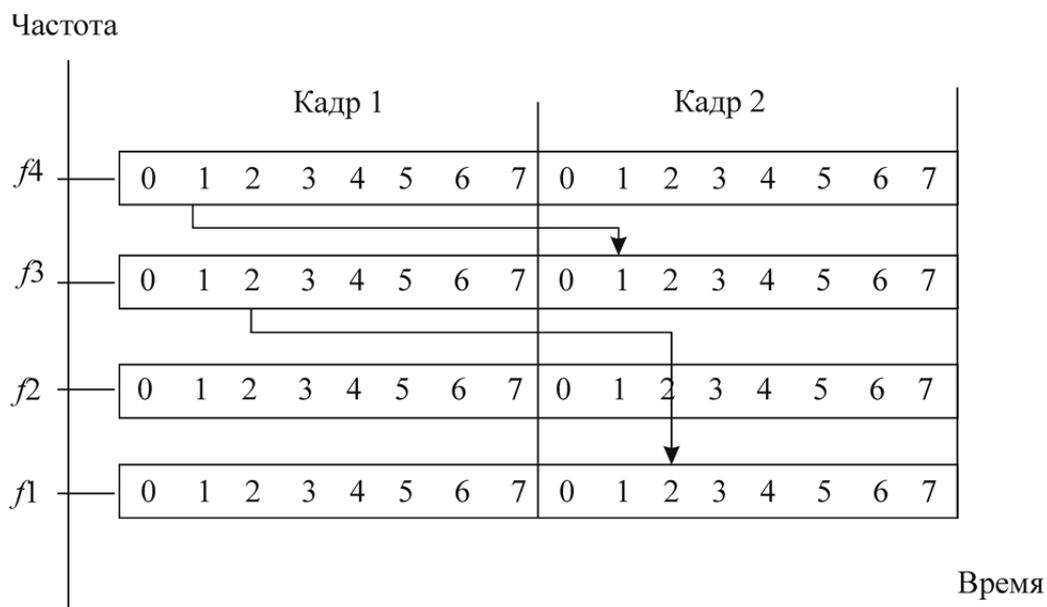


Рис. 31. Медленные перескоки частоты

Скорость (частота) перескоков может быть получена из выражения

$$\frac{1}{4,615 \text{ мс}} = 216,6 \text{ Гц},$$

где 4,615 мс – длительность кадра TDMA.

При перескоках частот сохраняется дуплексный разнос в 45 МГц. Все абоненты в пределах соты «перескакивают» синхронно. Частотно-временная матрица и начальная частота доводятся до каждой МС в процессе организации канала. Матрица формируется так, чтобы исключить взаимные помехи как внутри соты, так и в смежных сотах. В GSM используется 64 псевдослучайные структуры (матрицы) перескоков частоты.

2.5.9. Адаптивная эквалаизация

Создание модели канала и корректировка сигнала осуществляются с помощью *эквалайзера*.

Спецификации GSM предусматривают, что эквалайзер должен обеспечивать выравнивание импульсных сигналов со средне-квадратическими отклонениями времени задержки до 16 мкс. Работа эквалайзера основана на использовании *алгоритма Витерби*. В формате передаваемого сигнала предусматривается наличие стандартной кодовой комбинации. На приемном конце принятая кодовая комбинация сравнивается с эталонной, и по результатам сравнения вырабатывается модель канала. После создания модели принятый сигнал корректируется, при этом маловероятные комбинации за счет использования алгоритма Витерби не учитываются для сокращения вычислений. Таким образом, для устранения помех, вызываемых временной дисперсией, необходима передача дополнительной информации, обеспечивающей функционирование эквалайзера. Адаптивная эквалаизация обеспечивает оптимальный прием в условиях временной дисперсии (интерференции битов) в радиоканале из-за «дальней» многолучевости.

Адаптивная эквалаизация использует 26-битные тренировочные последовательности в NB. Имеется семь типов таких последовательностей под разные модели окружающего пространства (холмистость, здания и т. п.). В GSM используют адаптивную эквалаизацию типа Витерби, идею которой иллюстрирует рис. 32.

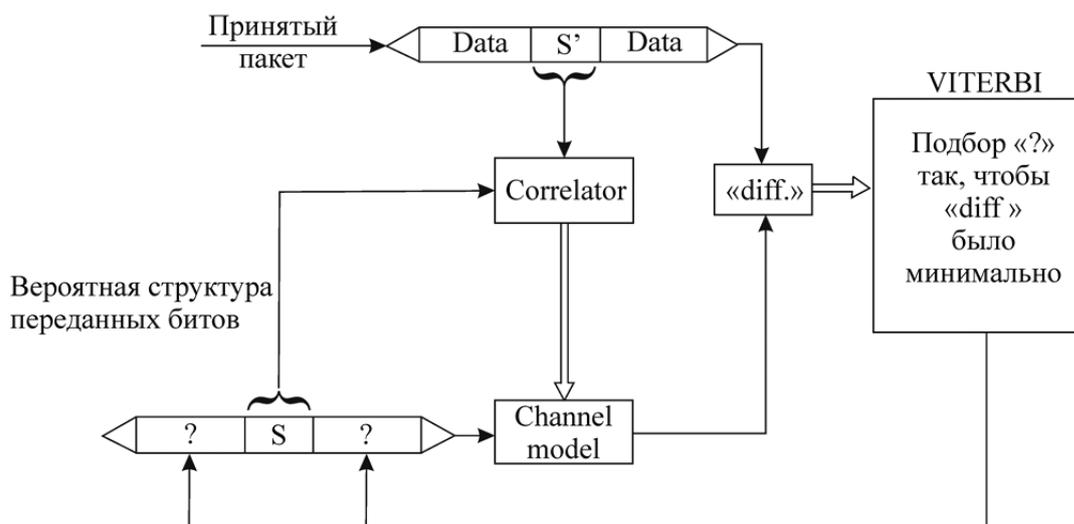


Рис. 32. Адаптивная эквалаизация

Последовательность шагов алгоритма следующая:

- 1) БС передает на МС, какой тренировочной последовательностью надо пользоваться;
- 2) МС передает на БС пакеты NB с этой последовательностью;
- 3) БС сравнивает принятую последовательность с опорной и выявляет разницу из-за потерь в канале;
- 4) БС «настраивает» алгоритм приема бит так, чтобы минимизировать разницу с принятым.

Алгоритм адаптивной эквализации работает достаточно хорошо на дистанции (разности хода лучей) не более 5 км.

2.5.10. Временное опережение передачи

Временное опережение передачи – решение проблемы выравнивания по времени слотов от удаленных на разные расстояния МС.

Суть метода: БС передает МС инструкцию временного опережения, предписывающую начинать передачу на n бит раньше по времени, чем «положено». Это позволяет сгладить задержки на распространение радиосигнала между МС и БС.

В GSM n лежит в пределах 1–63 бита. Указанное обстоятельство также ограничивает радиус соты до 35 км.

$$63 \text{ бита} = 31,5 \text{ туда} + 31,5 \text{ обратно},$$

$$31,5 \text{ бит} \cdot 3,69 \text{ мкс} = 116,2 \text{ мкс},$$

$$116,2 \text{ мкс} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с}) = 34,9 \text{ км}.$$

Скорость передачи. Для передачи по одному частотному каналу в GSM представляется цифровой поток

$$(8 \cdot 33,8 \text{ Кбит/с}) = 270,4 \text{ Кбит/с}.$$

При этом ширина полосы канала 200 кГц. Простые виды модуляции несущей обеспечивают скорость передачи, не превышающую ширину полосы, т. е. на 200 кГц – 200 Кбит/с.

2.5.11. Аутентификация

Для исключения несанкционированного использования ресурсов ССС в нее введены механизмы аутентификации. ЦАУ состоит из нескольких блоков и формирует ключи и алгоритмы аутентификации. С его помощью проверяются полномочия абонента и осуществляется его доступ к сети. ЦАУ принимает решения о параметрах процесса аутентификации и определяет ключи шифрования на основе базы данных, находящейся в РИО.

С помощью информации, записанной в SIM-карте, в результате обмена данными между МС и сетью осуществляется полный цикл аутентификации и разрешается доступ абонента к сети.

Полученная абонентом SIM-карта применяется в процедурах аутентификации и шифрования. На ней хранятся следующие данные:

– международный идентификационный модуль пользователя IMSI (International Mobile Subscriber Identity);

– индивидуальный ключ аутентификации пользователя K_i (Individual Subscriber Authentication Key);

– алгоритмы для аутентификации и шифрования A_3 , A_8 .

IMSI, K_i , A_3 и A_8 используются для вычисления триплетов, т. е. тройки аутентификационных параметров.

Триплет состоит из:

– псевдослучайного числа RAND (RANDOM number);

– отклика для аутентификации SRES (Signed RESponse);

– кода для шифрования радиопередачи K_c (Cipher Key).

Алгоритм аутентификации пользователей поясняется на рис. 33, где АС – центр аутентификации; MSC – центр коммутации мобильной связи.

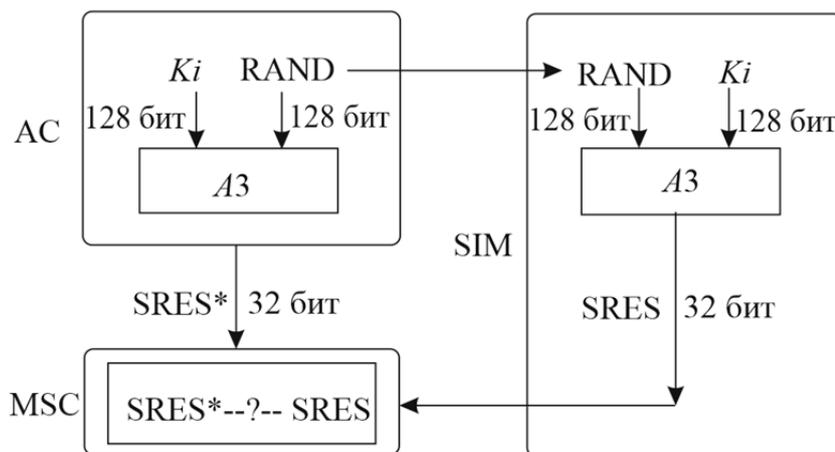


Рис. 33. Алгоритм аутентификации

Генератор случайной последовательности, входящий в состав центра аутентификации АС, вырабатывает случайный код RAND. Затем значение RAND и индивидуальный ключ аутентификации пользователя K_i с помощью алгоритма A_3 аутентификации формируют последовательность-отклик $SRES^*$. Одновременно RAND

передается на МС, где в SIM выполняются аналогичные процедуры и формируется SRES, которая передается на MSC. В MSC SRES* сравнивается с SRES. В случае совпадения абоненту предоставляется доступ к услугам сети. В противном случае мобильный абонент получает отказ в обслуживании.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое «сегментация» в процессе обработки речевых сигналов при передаче между МС и БС?
2. Для чего применяется метод линейного предиктивного кодирования?
3. Чему равен интервал сегментации в GSM?
4. Какие скорости передачи данных применяются в GSM?
5. Как подразделяются входные биты по степени важности при канальном кодировании?
6. В чем суть алгоритма шифрования A5?
7. Для чего в GSM применяется технологическая пауза в 9,6 мкс?
8. Обрисуйте структуру пакета нормального типа при передаче.
9. Что понимают под «форматированием пакетов»?
10. Какова структура кадров в GSM?
11. В чем суть алгоритма «перескоки частоты»?
12. Где применяются «тренировочные последовательности»?
13. В чем суть алгоритма «временного опережения передачи»?
14. Как рассчитывается скорость передачи в GSM?
15. Какова суть механизма аутентификации в GSM? Какие стандартные алгоритмы при этом используются?
16. Что такое «триплет» и из чего он состоит?

2.6. Сотовые системы стандарта CDMA

Компанией Qualcomm (США) была разработана СМС общего пользования с кодовым разделением каналов. Основными стимулами явились увеличение абонентской емкости по сравнению с действующими СМС, основанными на традиционном частотно-временном доступе, улучшение качества обслуживания и повышение информационной безопасности.

Технические требования к системе CDMA (стандарт получил название cdmaOne) сформированы в ряде стандартов TIA: IS-95 –

эфирный интерфейс (радиоинтерфейс); IS-96 – интерфейс речевых служб; IS-97 – интерфейс мобильной станции; IS-98 – интерфейс базовой станции; IS-99 – интерфейс службы передачи данных.

IS-95 рассчитана на работу в диапазоне частот 800 МГц, причем для прямого канала (линия «вниз») выделен участок спектра 869,04–893,97 МГц, а для обратного (линия «вверх») – 824,04–848,96 МГц. Ширина полосы канала связи составляет 1,25 МГц, поэтому при развертывании IS-95 операторы могут осуществлять частотное планирование, исходя из указанных полос.

2.6.1. Технология CDMA

Технология организации множественного доступа с кодовым разделением каналов основана на применении сложных сигналов, полоса которых значительно превышает ширину спектра информационного сообщения. В широкополосной системе исходный модулирующий сигнал с полосой всего несколько килогерц распределяют в полосе частот, ширина которой может быть несколько мегагерц. Это осуществляется путем двойной модуляции несущей передаваемым информационным сигналом и широкополосным кодирующим сигналом. Основной характеристикой широкополосного сигнала является его база B , определяемая как произведение ширины спектра сигнала F на его период T . В результате перемножения сигнала источника псевдослучайного шума с информационным сигналом энергия последнего распределяется в широкой полосе частот, т. е. его спектр расширяется.

Информация может быть введена в широкополосный сигнал (ШПС) несколькими способами. Наиболее известный способ заключается в наложении информации на широкополосную модулирующую кодовую последовательность перед модуляцией несущей для получения ШПС.

Сущность широкополосной связи состоит в расширении полосы частот сигнала, передаче ШПС и выделении из него полезного сигнала путем преобразования спектра принятого ШПС в первоначальный спектр информационного сигнала. Перемножение принятого сигнала и сигнала такого же источника псевдослучайного шума (ПСП), который использовался в передатчике, сжимает спектр полезного сигнала и одновременно расширяет спектр фонового шума и других источников интерференционных помех. Результирующий выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе приемника есть функ-

ция отношения ширины полос широкополосного и базового сигналов: чем больше расширение спектра, тем больше выигрыш. Во временной области – это функция отношения скорости передачи цифрового потока в радиоканале к скорости передачи базового информационного сигнала. Для стандарта IS-95 отношение составляет 128 раз, или 21 дБ. Это позволяет системе работать при уровне интерференционных помех, превышающих уровень полезного сигнала на 18 дБ, так как обработка сигнала на выходе приемника требует превышения уровня сигнала над уровнем помех всего на 3 дБ. В реальных условиях уровень помех значительно меньше. Кроме того, расширение спектра сигнала (до 1,23 МГц) можно рассматривать как применение методов частотного разнесения приема.

В системе IS-95 реализовано прямое расширение спектра с использованием функций Уолша длины 64 (порядков от 0 до 63) и двух типов псевдослучайных последовательностей (ПСП): короткой и длинной. Все они являются общими для базовых и мобильных станций, однако реализуют разные функции (табл. 4).

Расширение спектра обеспечивается за счет модуляции сигнала ПСП с частотой следования дискретов 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 модулирующей последовательности. Полоса сигнала с расширенным спектром по уровню 3 дБ составляет 1,23 МГц, причем при помощи цифрового фильтра формируется спектр, близкий к прямоугольному.

Таблица 4

Параметры кодовых последовательностей в стандарте IS-95

Тип сигнала	Длина кода	Выполняемые функции	
		БС	МС
Кол Уолша	64	Кодовое уплотнение или разделение 64 каналов CDMA	Помехоустойчивое кодирование
Короткий код	32 768	Разделение сигналов БС по величине циклического сдвига	Код с одинаковым фиксированным циклическим сдвигом как опорный сигнал скремблера
Длинный код	$2^{42} - 1$	Прореженный длинный код как опорная последовательность скремблера	Длинный код с разными циклическими сдвигами как адресная последовательность

Число абонентов в системе CDMA зависит от уровня взаимных помех. Согласованные фильтры БС весьма чувствительны к эффекту «ближний – дальний», когда МС, расположенная вблизи базовой, работает на большой мощности, создавая недопустимо высокий уровень помех при приеме других, «дальних» сигналов, что приводит к снижению пропускной способности системы в целом. Эта проблема существует у всех ССС, однако наибольшие искажения сигнала возникают именно в CDMA-системах, работающих в общей полосе частот, в которых используются ортогональные шумоподобные сигналы. Если бы в этих системах отсутствовала регулировка мощности, то они существенно уступали бы по характеристикам сотовым сетям на базе TDMA. Поэтому ключевой проблемой в CDMA-системах можно считать *индивидуальное управление мощностью каждой станции*. Эффективная работа системы с кодовым доступом возможна лишь при условии выравнивания сигнала от различных абонентов на входе БС. Причем чем выше точность выравнивания, тем больше зона покрытия системы. Прямой канал менее подвержен искажениям сигнала, поскольку на БС всегда существует запас по мощности; поэтому основные проблемы возникают при регулировке мощности в обратном канале – от абонента к БС.

В стандарте IS-95 регулировка мощности МС осуществляется в динамическом диапазоне 84 дБ с шагом 1 дБ, т. е. с точностью $\pm 0,5$ дБ. Интервал между соседними измерениями равен 1,25 мс. Биты управления мощностью передаются по каналу трафика со скоростью 800 бит/с. Раздельная обработка многолучевых сигналов с последующим их сложением обеспечивает требуемое отношение сигнал/шум в 6–7 дБ.

Применение нескольких параллельно работающих каналов при раздельной обработке лучей позволяет осуществить «мягкий» режим переключения МС при переходе абонента из одной соты в другую. Абонентская емкость ячейки системы CDMA оптимизируется использованием алгоритма регулировки, который ограничивает мощность, излучаемую каждой МС, до необходимого уровня для получения приемлемой вероятности ошибки.

Процесс регулирования мощности передающих устройств в обратном канале (от абонента к БС) заключается в следующем. Каждая МС непрерывно передает информацию об уровне ошибок в принимаемом сигнале. На основании этой информации БС рас-

пределяет излучаемую мощность между абонентами таким образом, чтобы в каждом случае обеспечить приемлемое качество речи. Абоненты, на пути к которым радиосигнал испытывает большее затухание, получают возможность излучать сигнал большей мощности. Основная цель регулировки мощности в обратном канале – оптимизация площади соты.

Регулирование мощности как в прямом, так и в обратном канале, влияет на срок службы аккумуляторов МС. Средняя излучаемая мощность МС в CDMA меньше, чем в системах, использующих другие методы доступа. Это непосредственно связано с такими параметрами радиотелефона, как длительность непрерывного занятия канала и время нахождения в режиме ожидания.

Требуемое качество передачи данных в системе достигается с помощью довольно мощного канального кодирования, выполняемого в несколько этапов (рис. 35). На первом, предварительном этапе цифровой речевой сигнал с выхода вокодера, структурированный в кадры длительностью в 20 мс, кодируется блоковым циклическим кодом для формирования индикатора качества кадра и дополняется «хвостом», необходимым для последующего сверточного кодирования. Введение подобной избыточности увеличивает фактические скорости данных, заменяя первоначальный их набор на 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с.

Следующим этапом является сверточное кодирование. В прямом канале используется код с длиной кодового ограничения 9 и скоростью 12, тогда как код в обратном канале, обладающим меньшей помехоустойчивостью, имеет вдвое большую избыточность, т. е. скорость $1/3$ при той же длине кодового ограничения. Наконец, на третьем этапе выполняется перемежение информационного потока в кадре для нейтрализации эффекта пакетирования ошибок.

Помимо перемежения, для борьбы с быстрыми замираниями в системе использовано и *многолучевое разнесение*, т. е. приемники на основе алгоритма RAKE. Для этого на БС используется минимум четыре, а на МС – три параллельно работающих коррелятора. Помимо этих корреляторов, настраиваемых на определенную задержку, в каждом приемнике имеется еще и сканирующий по задержке канал, позволяющий осуществлять настройку RAKE-каналов на сигналы с наибольшей интенсивностью. Наличие нескольких параллельных каналов корреляционной обработки позволяет осуществить мягкую эстафетную передачу при переходе МС из одной соты в другую.

2.6.2. Структура сети CDMA

Состав оборудования сетей стандарта CDMA во многом схож с составом оборудования сетей стандарта GSM и включает в себя МС и БС, цифровые коммутаторы, центр управления и обслуживания, различные дополнительные системы и устройства; функциональное сопряжение элементов системы осуществляется с помощью ряда интерфейсов. Конфигурация сотовой сети стандарта CDMA представлена на рис. 34.

Основное отличие от сетей GSM заключается в том, что в состав сети CDMA стандарта IS-95 включены устройства оценки качества и выбора блоков (SU – Selector Unit). Кроме того, для реализации процедуры мягкого переключения между базовыми станциями, управляемыми разными BSC, вводятся линии передачи между SU и BSC. В центре коммутации мобильной связи (MSC) устанавливается преобразователь-транскодер TCE, который преобразует выборки речевого сигнала из одного цифрового формата в другой.

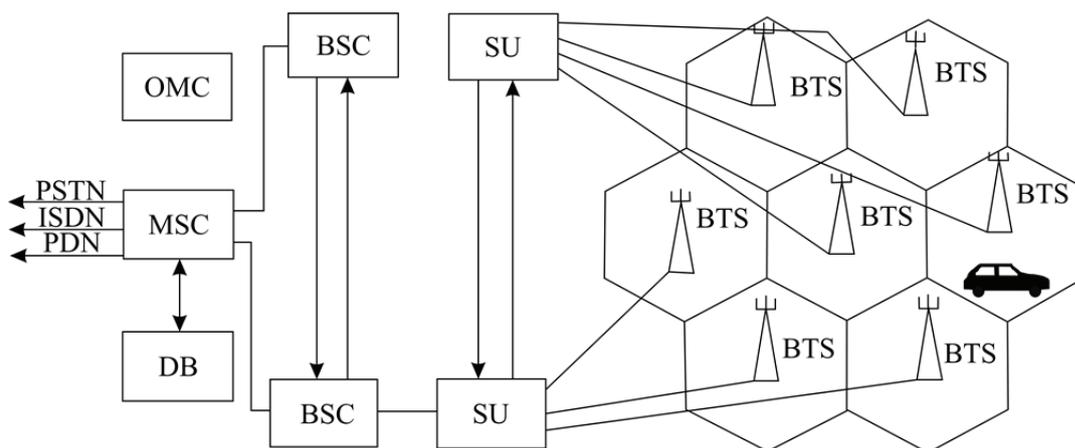


Рис. 34. Конфигурация сети стандарта CDMA:

MS – мобильная станция; BTS – базовая станция;

SU – устройство выбора кадра; MSC – центр коммутации мобильной связи;

DB – база данных; BSC – контроллер базовой станции;

OMC – центр управления и обслуживания;

PSTN – телефонная сеть общего пользования;

ISDN – цифровая сеть с интеграцией служб; PDN – сеть пакетной коммутации

2.6.3 Организация каналов в стандарте CDMA

В стандарте CDMA (IS-95, IS-96) все каналы передачи сигналов от БС называются прямыми, а от МС – обратными. Именно этот признак был положен разработчиками стандарта в основу структуры каналов.

В прямом канале (рис. 35) модуляция сигнала функциями Уолша (бинарная фазовая манипуляция) используется для различения разных физических каналов данной БС; модуляция длинной ПСП (бинарная фазовая манипуляция) – с целью шифрования сообщений; модуляция короткой ПСП (квадратурная фазовая манипуляция двумя ПСП одинакового периода) – для расширения полосы и различения сигналов разных БС.



Рис. 35. Схема обработки сигналов в передающем тракте базовой станции

Различение сигналов разных станций обеспечивается тем, что все БС используют одну и ту же пару коротких ПСП, но со сдвигом на 64 дискрета между разными станциями, т. е. всего в сети 511 кодов; при этом все физические каналы одной БС имеют одну и ту же фазу последовательности.

На БС формируется 4 типа каналов: канал пилот-сигнала (PI), синхροканал (SYNC), вызывной канал (PCH) и канал трафика (TCH).

В обратном канале (рис. 36) модуляция сигнала короткой ПСП используется только для расширения спектра, причем все подвижные станции используют одну и ту же пару последовательностей с одинаковым (нулевым) смещением. Модуляция сигнала длинной ПСП кроме шифрования сообщений несет информацию о МС в виде ее закодированного индивидуального номера и обеспечивает различение сигналов от разных МС одной ячейки за счет индивидуального для каждой станции сдвига последовательности.

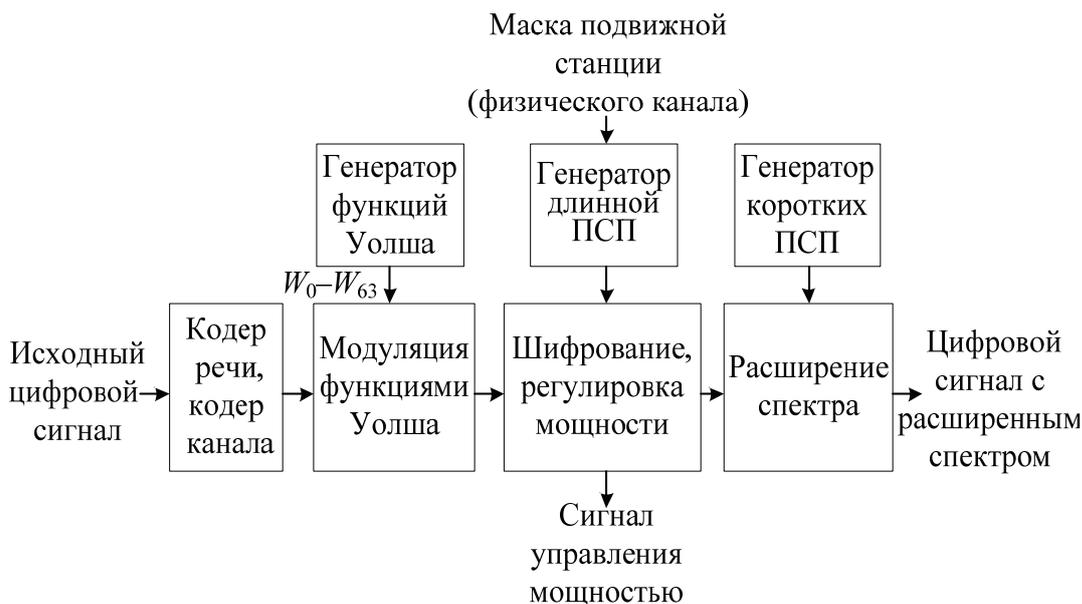


Рис. 36. Схема обработки сигналов в передающем тракте подвижной станции

В системах, использующих метод CDMA, изменяя синхронизацию источника псевдослучайного шума, можно использовать один и тот же участок полосы частот для работы во всех ячейках сети. Такое 100%-е использование доступного частотного ресурса – один из основных факторов, определяющих высокую абонентскую емкость сети стандарта CDMA и упрощающих ее организацию. Системы на базе CDMA имеют динамическую абонентскую емкость. И хотя имеется 64 кода Уолша, этот теоретический предел не достигается в реальных условиях, и абонентская емкость системы ограничивается внутрисистемной интерференцией, вызванной одновременной работой МС и БС соседних ячеек.

Важную роль в системах на базе CDMA играет канал передачи пилот-сигнала, который излучается каждой БС непрерывно в широкополосном режиме и может быть принят одновременно всеми МС, расположенными в зоне ее обслуживания.

Для установления начальной синхронизации используется синхронизационный канал SYNC. Традиционно передача вызовов с БС на МС осуществляется по вызывному каналу РСН, а многостанционный доступ реализуется по каналу АСН.

Для предоставления разных услуг связи в CDMA используются два типа каналов. Первый из них называется основным (FCH), а второй – дополнительным (SCH). Услуги, предоставляемые через

эту пару каналов, зависят от схемы организации связи. Каналы могут быть адаптированы для определенного вида обслуживания и работать с разными размерами кадра, используя любое значение скорости из двух скоростных рядов: RS-1 (1500, 2700, 4800 и 9600 бит/с) или RS-2 (1800, 3600, 7200 и 14400 бит/с). Определение и выбор скорости приема осуществляется автоматически.

Для систем с CDMA и, в частности, для IS-95 характерна определенная асимметрия линий «вниз» и «вверх»: в первой из них все абонентские сигналы передаются из одной пространственной точки и потому могут быть легко синхронизированы (синхронный вариант CDMA). В направлении же от МС к БС приходится применять асинхронное кодовое разделение. Временные шкалы отдельных БС сети IS-95 также синхронизированы. Для этого каждая БС оборудована приемником радионавигационной системы GPS. Благодаря единому системному времени кодовое разделение сигналов различных БС, занимающих один и тот же частотный канал, осуществлено за счет применения различных сдвигов одной и той же короткой ПСП.

Линия «вниз». Логические каналы линии «вниз» включают:

- пилотный канал;
- канал синхронизации;
- канал персонального вызова;
- канал прямого трафика.

Отображение логических каналов на физические в прямом направлении осуществляется с помощью системы ортогональных функций Уолша длины 64: $W_i = 0, 1, \dots, 63$, где i – номер функции Уолша. Стандартом IS-95 предусматривается организация одного пилотного канала, одного канала синхронизации, от одного до семи каналов вызова (в зависимости от абонентской нагрузки на БС) и от 55 до 62 каналов прямого трафика (часть каналов вызова допускается использовать в качестве каналов трафика).

Пилотный канал. Пилотный канал предназначается для начальной синхронизации МС с сетью и оценки параметров прямого канала приемником МС. Мощность, отведенная пилотному каналу, обычно на 4–6 дБ превышает мощность в канале трафика. Тем самым обеспечиваются, с одной стороны, условия для надежного ввода и последующей устойчивой работы петель автоподстройки фазы и задержки когерентного приемника МС, а с другой –

точность измерений параметров сигнала БС, достаточная для процедур RAKE, эстафетной передачи и управления мощностью БС.

Пилотному каналу присвоена нулевая функция Уолша W_0 , т. е. последовательность из одних нулей. Информационные данные по этому каналу не передаются, т.е. могут также трактоваться как последовательность из одних нулей. После сложения по модулю 2 этих двух последовательностей результирующий поток (также состоящий из одних нулей) поступает в преобразователь, превращающий булевы значения символов «0», «1» в двуполярные отсчеты «+1», «-1» соответственно (рис. 37). После объединения с сигналами других физических каналов суммарный сигнал поступает на КФМ-модулятор, в котором подвергается прямому расширению спектра, перемножаясь с двумя псевдослучайными скремблирующими последовательностями ПСП-I и ПСП-Q (символы I и Q отвечают синфазной и квадратурной составляющим).

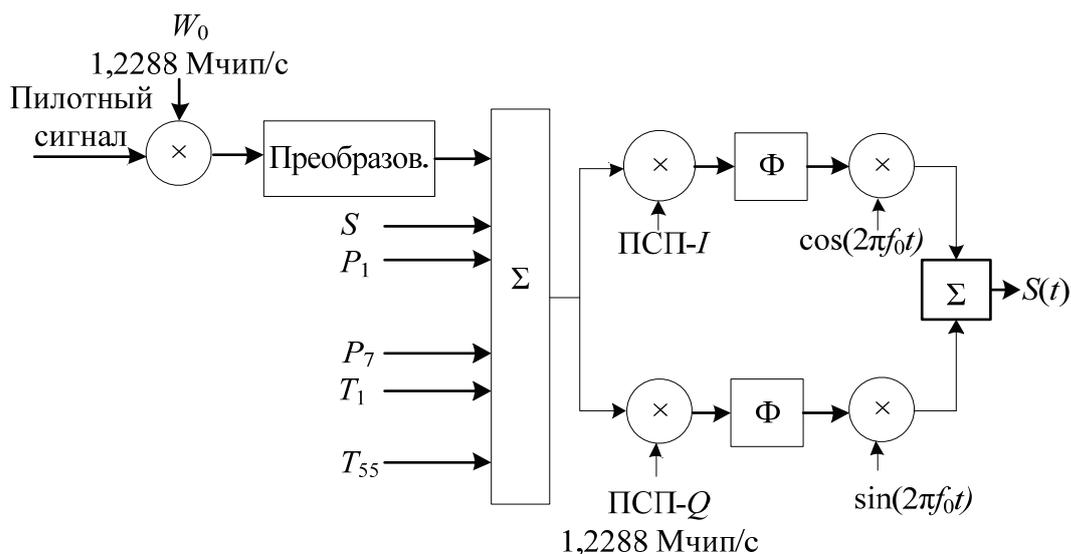


Рис. 37. Структурная схема пилотного канала

Фактически в пилотном канале передается только пара ПСП-I и ПСП-Q, т. е. комплексная ПСП. Данная комплексная короткая ПСП одинакова для всех 64 CDMA-каналов и используется всеми БС системы, но с разными циклическими сдвигами. Разница в циклических сдвигах позволяет МС разделять сигналы, излучаемые БС разных сот или секторов, т. е. позволяет идентифицировать номер БС либо сектора. Для различных БС сдвиг изменяется с постоянным шагом, равным $64 \text{ чип} \cdot \text{PILOT_INC}$, где системный параметр

PILOT_INC принимает значения от 1 до 4. (Обычно битовый сигнал заменяется чиповой последовательностью из 64 или 128 бит).

Таким образом, при минимальном шаге доступны $2^{15} / 2^6 = 2^9 = 512$ сдвигов коротких ПСП, т. е. возможно бесконфликтное существование сети, состоящей из 512 БС. Если же необходимо, чтобы сеть состояла из большего числа БС, то при территориальном планировании сети легко можно добиться, чтобы БС с одинаковыми циклическими сдвигами коротких ПСП не могли одновременно находиться в зоне радиовидимости МС.

С другой стороны, шаг сдвига ПСП однозначно определяет размер соты (или сектора), при котором МС с гарантией различает ПСП, имеющие минимальный временной сдвиг. При минимальном сдвиге в 64 бита радиус соты составит порядка 15,5 км.

Канал синхронизации. После вхождения в синхронизм с пилот-сигналом МС располагает информацией о фазе, принимаемой несущей, временных границах чипов и периодов короткой ПСП (один период занимает $2^{15} / 1.2288 \cdot 10^6 = 26.666... \text{ мс}$), тогда как для приема сообщений необходимо знать границы кадров (каждый кадр трафика занимает 20 мс. Соответствующие сведения наряду с другими, нужными для установления и поддержания соединения, МС получает по каналу синхронизации. В формате сообщения этого канала содержатся данные о точном времени в системе, значении циклического сдвига короткой ПСП данной БС, идентификаторы БС и ЦК, значение мощности сигнала в пилотном канале, параметры длинной ПСП, скорость передачи данных в канале персонального вызова. Структуру физического канала синхронизации поясняет рис. 38.

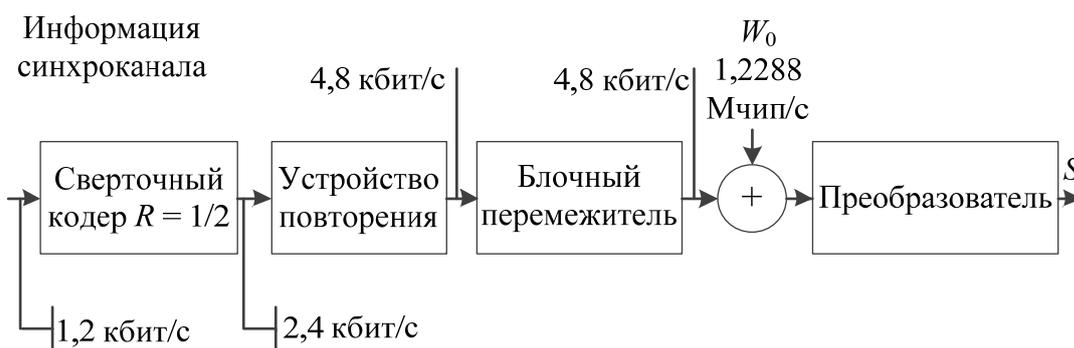


Рис. 38. Структурная схема канала синхронизации

Данные канала синхронизации, поступающие со скоростью 1200 бит/с, подаются на вход сверточного кодера. После осуществления операции кодирования (длина кодового ограничения

9, скорость кода $1/2$) с выхода снимается двоичная последовательность со скоростью 2400 бит/с, поступающая далее на устройство повторения, после которого скорость потока данных удваивается до 4800 бит/с.

Информация, передаваемая по каналу, структурирована в кадры длительностью в 26,666... мс. Каждый кадр содержит 32 бита исходных данных (128 символов с учетом сверточного кодирования и повторения). Следующей операцией является блочное перемежение в пределах кадра синхроканала, служащее для борьбы с пакетными ошибками. После блочного перемежителя поток данных подвергается прямому расширению спектра путем сложения по модулю 2 с присвоенной каналу синхронизации функцией Уолша W_{32} и преобразования булевых переменных в действительные «+1» и «-1».

Каждому биту информационного потока с выхода перемежителя (скорость 4,8 кбит/с) сопоставляется $1,2288 \cdot 10^6 / 4,8 \cdot 10^3 = 256$ чипов, т. е. четыре периода последовательности Уолша. Каждый бит кодированного потока в зависимости от значения заменяется четырьмя периодами прямой или инвертированной функции Уолша W_{32} .

Последующие операции в канале повторяют рассмотренные ранее: сигнал канала синхронизации объединяется с сигналами других каналов, поступая на вход S на рис. 38, после чего в КФМ-модуляторе перемножается с комплексной короткой ПСП (скремблируется) и переносится на несущую.

Канал персонального вызова. Канал персонального вызова предназначен для вызова МС и передачи ей системной информации. После получения БС сигнала подтверждения от МС по этому же каналу передается информация об установлении соединения и назначении канала связи. Структурная схема формирования сигналов канала персонального вызова представлена на рис. 39.

Скорость поступления информации в этом канале составляет 4,8 или 9,6 кбит/с. Исходный битовый поток проходит через сверточный кодер при входной скорости в 4,8 кбит/с и устройство повторения. При любой из двух начальных скоростей скорость кодированного потока составляет 19,2 кбит/с. После блочного перемежения в пределах 20-миллисекундного кадра поток данных скремблируется длинной ПСП периода $2^{42} - 1$. Затем поток данных подвергается расширению спектра: суммируется по модулю два с отведенной каналу функцией Уолша из набора $W_1 + W_7$ с последующим переходом от булевых переменных к действительным

«+1» и «-1». Далее следует объединение с остальными каналами (входы P_1-P_7 на рис. 39), а в модуляторе перемножение с комплексной короткой ПСП и перенос на несущую.

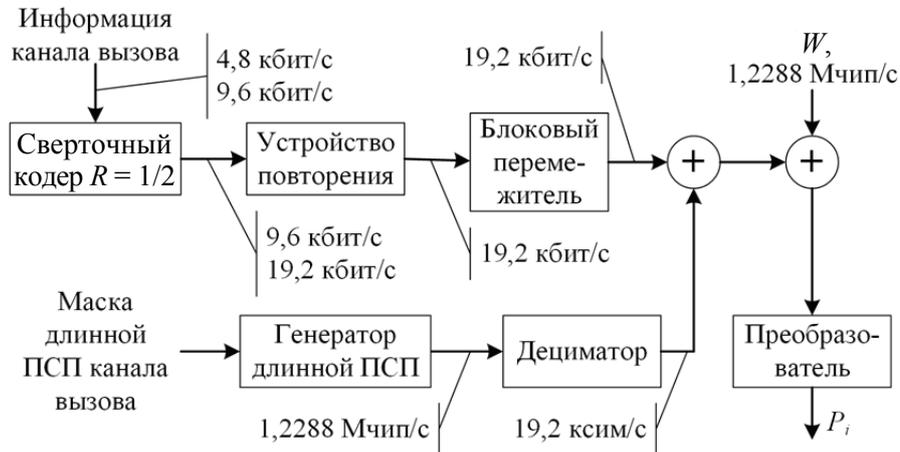


Рис. 39. Структурная схема канала вызова

Канал прямого трафика. Каналы прямого трафика служат для передачи речевой информации и данных, а также информации сигнализации от БС к МС. Структура канала прямого трафика (рис. 40) за небольшим исключением в точности повторяет блок-схему канала персонального вызова.

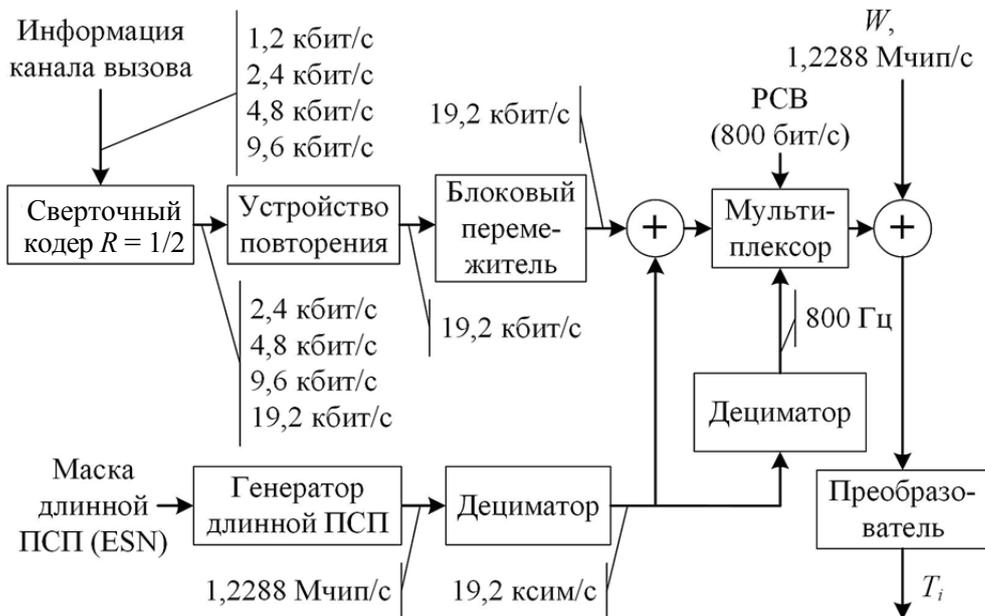


Рис. 40. Структурная схема канала прямого трафика

Основное отличие заключается в присутствии устройства мультиплексирования потока информационных данных и битов регулировки мощности, а также в поддержании набора из 4 различных скоростей – 9,6, 4,8, 2,4 и 1,2 кбит/с, выбираемых в соответствии с текущей речевой активностью абонента.

Поток кодированных речевых данных поступает от вокодера со скоростью 8,6; 4,0; 2;0 или 0,8 кбит/с. После кодирования блоковым циклическим кодом CRC и приписывания «хвостовых» нулей для сверточного кодирования поток увеличивает скорость до соответствующего значения из четырех упомянутых.

Сверточное кодирование удваивает символьную скорость. На устройство повторения подается поток данных с одной из следующих скоростей: 19,2; 9,6; 4,8 и 2,4 кбит/с. Устройство повторения осуществляет выравнивание скоростей: поток данных с максимальной скоростью проходит повторитель без изменения, а скорость потока с более низкими значениями увеличивается за счет посимвольного повторения в 2, 4 и 8 раз соответственно. Целью выравнивания является снижение уровня внутрисистемных помех, обусловленных эффектом многолучевости или сигналами соседних секторов БС. Улучшение помеховой ситуации достигается снижением излучаемой мощности, пропорциональным числу повторений символов.

После символьного повторителя поток информационных данных подвергается процедуре блокового перемежения на длительности кадра в 20 мс, а затем скремблируется длиной ПСП.

Маска, задающая начальное состояние генератора ПСП, определяется электронным серийным номером МС в соответствии с некоторым секретным ключом.

Скремблированные данные далее мультиплексируются с командами регулировки мощности передатчика МС: определенные символы потока данных на входе мультиплексора заменяются РСВ-битами. Поскольку скорость поступления данных составляет 19,2 кбит/с, а частота РСВ-битов – 800 Гц, то замене подлежит лишь один из 24 символов информационной последовательности, причем РСВ-бит помещается в одну из первых 16 позиций. Точное положение бита регулировки мощности определяется псевдослучайным образом. Указателем позиции РСВ-бита служит десятичное значение 4 наиболее значимых битов с выхода первого дециматора.

Мультиплексированный поток данных манипулирует каналную поднесущую, в качестве которой используется одна из последовательностей Уолша $W_8 + W_{31}$ и $W_{33} + W_{63}$ с чиповой скоростью 1,2288 Мчип/с. Номер последовательности Уолша однозначно определяет номер канала прямого трафика. В результате каждому символу потока данных сопоставляется один период соответствующей функции Уолша, и тем самым осуществляется прямое расширение спектра информационного сообщения. После этого полученный сложный сигнал со скоростью 1,2288 Мчип/с в сумматоре (рис. 41) объединяется с сигналами каналов пилот-сигнала, синхронизации и вызова. Далее сигнал в модуляторе перемножается с комплексной ПСП (скремблируется) и переносится на несущую.

Помимо скоростей 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с, вокодер может поддерживать набор скоростей вида 14,4; 7,2; 3,6 и 1,8 кбит/с. Отличие структуры канала при этом состоит в изменении скорости сверточного кода до $3/4$ для поддержания скорости в 19,2 кбит/с на входе блокового перемежителя.

Линия «вверх». В обратном канале (линии «вверх») асинхронный вариант кодового разделения реализуется в комбинации с некогерентным приемом сигналов на БС. Благодаря этому отпадает необходимость в пилотном канале и канале синхронизации. В итоге остаются лишь два типа логических каналов линии «вверх»:

- канал доступа;
- канал обратного трафика.

Асинхронность кодового разделения делает нерациональным применение функций Уолша в роли каналообразующих последовательностей (сигнатур) физических каналов, так как при относительных временных сдвигах они не могут сохранять ортогональность и имеют весьма непривлекательные взаимные корреляционные свойства. Поэтому за разделение каналов в линии «вверх» отвечают различные циклические сдвиги длиной ПСП периода $2^{42} - 1$. Функции Уолша в обратном канале также используются, но в ином качестве: для организации еще одной ступени помехоустойчивого кодирования данных, передаваемых МС.

Каналы доступа и обратного трафика, которые используются МС, ассоциированы с определенными каналами персонального вызова. В результате на один канал персонального вызова может

приходиться до $n = 32$ каналов доступа и до $m = 64$ каналов обратного трафика.

Канал доступа. Канал доступа обеспечивает соединение МС с БС, пока МС не настроилась на назначенный ей канал обратного трафика. Процесс выбора канала доступа случаен – МС произвольно выбирает номер канала. Канал доступа используется для регистрации МС в сети, передачи на БС запроса на установление соединения, ответа на команды, переданные по каналу вызова и др. Скорость передачи данных по каналу доступа фиксирована и составляет 4,8 кбит/с. Процедура формирования сигнала в канале доступа представлена на рис. 41.

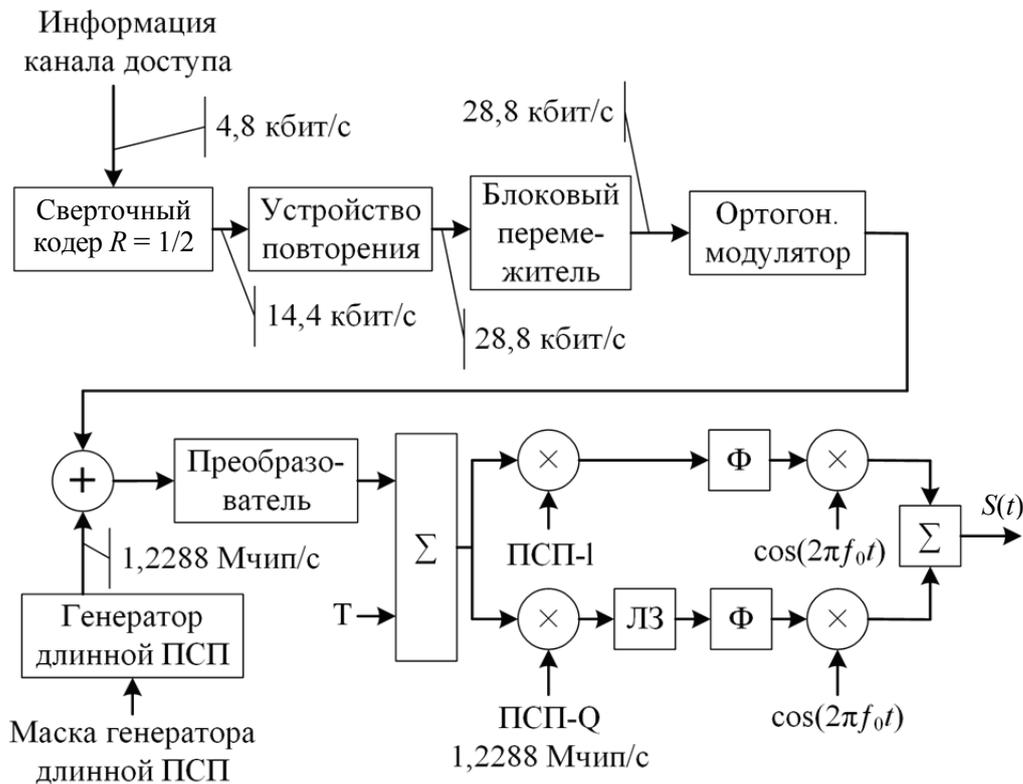


Рис. 41. Структурная схема канала доступа

Входные данные со скоростью 4,8 кбит/с подвергаются сверточному кодированию со скоростью $1/3$. Применение кодера с более низкой скоростью (большей избыточностью), чем в прямом канале, как уже говорилось, объясняется более низкой помехоустойчивостью обратного канала вследствие ограниченности энергоресурса МС. После кодирования скорость информационного потока в числе кодовых символов возрастает до 14,4 кбит/с.

Двукратное повторение символов в устройстве повторения доводит символьную скорость до величины 28,8 кбит/с. Применение блокового перемежения в пределах 20 мс кадра не меняет скорости информационного потока, так что на ортогональный модулятор данные поступают с прежней скоростью в 28,8 кбит/с.

Ортогональный модулятор осуществляет отображение (кодирование) групп из 6 двоичных символов в некоторую функцию Уолша длины 64. Подобная операция представляет собой кодирование 6-битовых блоков (64, 6) ортогональным кодом.

Во многих источниках рассматриваемую процедуру именуют ортогональной модуляцией или Уолш-модуляцией. Замена 6-символьной группы на функцию Уолша производится по следующему правилу: десятичное значение 6-разрядного двоичного числа, соответствующего группе из 6 бит, однозначно определяет номер функции Уолша. Например, если на вход ортогонального модулятора подается группа из 6 символов вида (010110), то ей соответствует десятичное значение 22, а значит, эта группа заменяется модулятором на функцию Уолша W_{22} состоящую из 64 символов. В результате ортогональной модуляции скорость 64 данных возрастает до $28,8 \cdot 64 / 4 = 307,2$ кбит/с.

Поток ортогонально модулированных данных подвергается прямому расширению спектра с помощью длинной ПСП с определенным циклическим сдвигом, однозначно определяющим данную МС, что позволяет идентифицировать ее на БС, а значит, осуществить кодовое разделение абонентов. Циклический сдвиг длинной ПСП определяется маской генератора длиной 42 бита, которая конструируется из идентификатора БС, номеров канала вызова и доступа.

После расширения спектра (суммирования по модулю 2 с длинной ПСП и преобразования булевых символов в дуполярные) поток, следующий со скоростью 1,2288 Мчип/с, поступает в квадратурные каналы фазового модулятора, где подвергается скремблированию двумя короткими ПСП (ПСП-I и ПСП-Q) периода 2^{15} . Все МС данной соты используют один и тот же сдвиг короткой ПСП. Поскольку в обратном канале применяется квадратурная ФМ со сдвигом (OQPSK), в плече Q модулятора введен элемент задержки на половину длительности чипа. Применение OQPSK уменьшает глубину нежелательных провалов огибающей сигнала, а значит, сокращает требуемый линейный динамический диапазон усилителя мощности передатчика МС.

Канал обратного трафика. Структура канала обратного трафика и процедуры формирования сигналов практически подобны, как и в канале доступа (рис. 42), но есть и отличия. Во-первых, скорость поступления данных в канал обратного трафика не фиксирована, а может изменяться в зависимости от речевой активности абонента. В канале осуществляется поддержка потока данных со скоростями 9,6; 4,8; 2,4 и 1,2 кбит/с. Во-вторых, маска генератора длинной ПСП формируется с использованием закодированного электронного серийного номера МС.

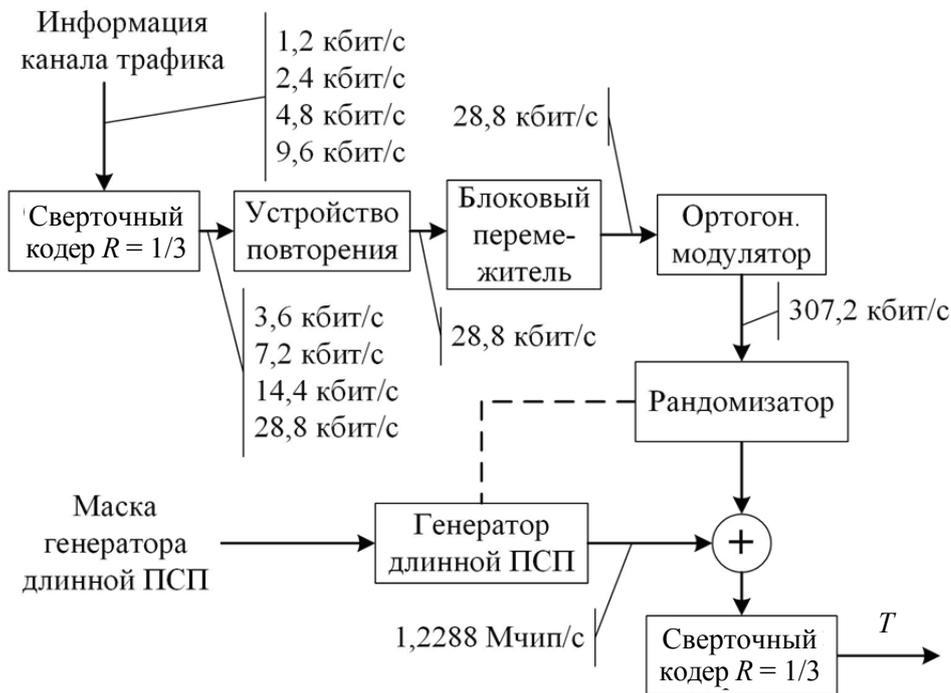


Рис. 42. Структурная схема канала обратного трафика

Наиболее же существенным отличием является наличие дополнительного блока, называемого рандомизатором. Назначение устройства состоит в снижении уровня внутрисистемных помех в обратном канале за счет учета фактора речевой активности абонента.

Метод уменьшения средней мощности излучения в обратном канале при снижении скорости речевого потока состоит в псевдослучайном прореживании (или маскировании) избыточных символов, образованных в результате операции символьного повторения. Рандомизатор вырабатывает маскирующий образец, состоящий из нулей и единиц, в соответствии с которым и осуществляется прореживание, причем соотношение между числом нулей, отвечаю-

щих за исключение символов, и единиц определяется скоростью речевого потока. Так, при максимальной скорости кодированной речи 9,6 кбит/с прореживание отсутствует, т. е. маскирующий образец состоит из всех единиц. Если же скорость речевого потока составляет 1,2 кбит/с, рандомизатор вырабатывает образец, устраняющий в среднем семь из восьми символов.

В канале обратного (как и прямого) трафика предусматривается также поддержание набора скоростей 14,4; 7,2; 3,6 и 1,8 кбит/с. При этом для сохранения скорости кодированного потока в 28,8 кбит/с скорость сверточного кодера меняется с 1/3 на 1/2.

Кадр обратного (как и прямого) трафика занимает 20 мс. При полноскоростном (9,6 кбит/с) режиме кадр содержит 192 битовых позиции; в случае полускоростного режима (скорости поступления информации 4,8 кбит/с) кадр состоит из 96 бит и так далее до 24 бит при скорости 1,2 кбит/с. При скоростях 9,6 и 4,8 кбит/с кадр содержит биты с информацией о качестве кадра (индикатор качества кадра). При всех скоростных режимах кадр заканчивается 8 кодированными хвостовыми битами.

Комбинированная передача первичной и вторичной (или служебной) информации определена стандартом IS-95 в двух режимах.

В первом режиме, называемом *blank and burst*, вторичная или служебная информация полностью замещает речевую информацию в кадре, а значит, передача информации различного типа может производиться только в разных кадрах.

Во втором режиме, носящем название *dim and burst*, в пределах кадра возможна совместная передача либо первичной и вторичной информации, либо первичной информации и информации сигнализации. Указанные режимы применяются лишь при полноскоростной передаче, т. е. при скоростях, меньших 9,6 кбит/с, передается исключительно первичная информация.

Вопросы для самопроверки

1. Чему равна ширина полосы канала связи в cdmaOne?
2. Что означает аббревиатура «IS» в названиях стандартов сотовой связи?
3. В чем сущность широкополосной связи в стандарте CDMA?
4. Какие кодовые последовательности применяются в IS-95?
5. Какие основные отличия структур сетей GSM и CDMA?
6. Какие типы модуляции применяются в прямом канале?

7. Какие четыре типа каналов формируются на БС?
8. Какие модуляции сигнала применяются в обратном канале?
9. Как выполняется ортогональное расширение с использованием функций Уолша?
10. Что называют чипом в системах CDMA?
11. В чем суть пилотного канала?
12. В чем суть канала синхронизации?
13. Как меняется информация в канале персонального вызова?
14. По какому каналу передается речевая информация?
15. В каких режимах передается информация в каналах обратного трафика?

РАЗДЕЛ 3

СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПОКОЛЕНИЯ 3G

3.1. Технологии поколения 2,5G+

На этапе развития GSM, соответствующем Фазе 2+, была поставлена и решена задача повышения скорости передачи данных за счет мобилизации ресурсов системы. Для этой цели использовались три технологии:

- HSCSD (High Speed Circuit Switched Data);
- GPRS (General Packet Radio Service);
- EDGE (Enhanced Data rates for the GSM Evolution).

На рис. 43 приведено сравнение достигнутых скоростей по этим технологиям с ISDN (64 кбит/с) и базовым GSM (до 14,4 кбит/с).

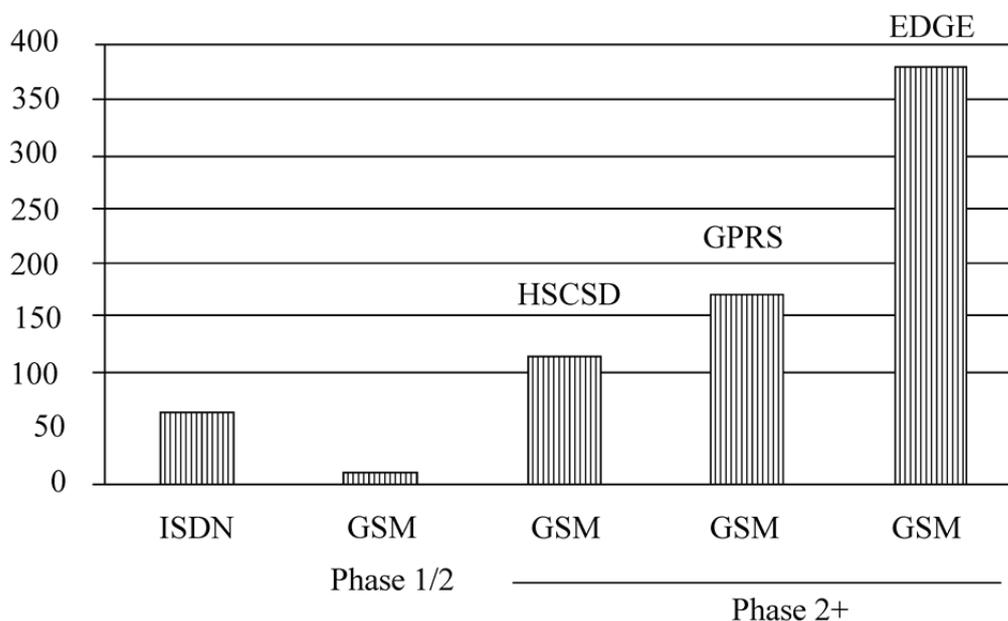


Рис. 43. Сравнение скоростей передачи данных

3.1.1. Технология HSCSD

Наиболее простой является технология HSCSD, предполагающая использование не одного, а нескольких слотов в кадре

TDMA, для передачи одного абонента (рис. 44). Стандарт предусматривает использование до четырех слотов. В результате максимальная скорость передачи достигает

$$4 \cdot 14,4 \text{ кбит/с} = 57,6 \text{ кбит/с.}$$

Технология HSCSD наиболее часто применяется для видеотелефонии. Она работает в режиме «точка-точка» и не нуждается в изменении структуры сети GSM. Меняется только программная часть.

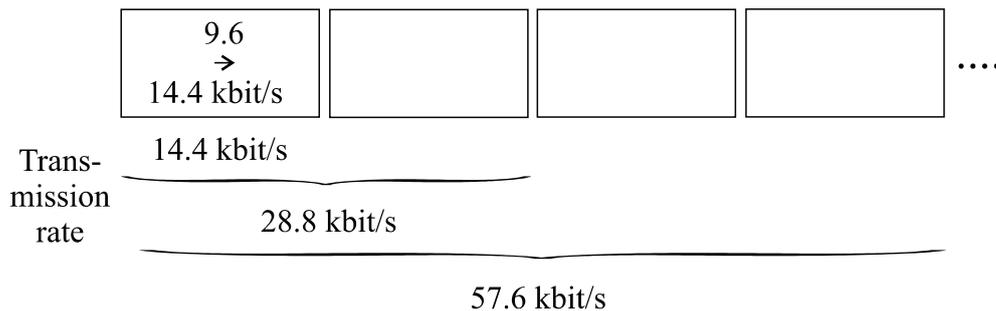


Рис. 44. Технология HSCSD

Недостатком этой технологии принято считать отсутствие возможностей повышения скорости и плохую «стыковку» с Internet.

3.1.2. Технология GPRS

Проблемы технологии HSCSD можно исключить, перейдя в систему, полностью ориентированную на пакетную передачу. Поэтому следующим шагом в направлении более гибкой передачи данных стало создание общей пакетной радиослужбы GPRS. Она предоставила пакетный режим приложениям, использующим частую передачу небольших объемов информации (запросы пользователей) или менее частую передачу в больших объемах (ответы Web-сервера). Требования к системе GPRS приведены в спецификации (ETSI, 1998a). По сравнению с предыдущими службами передачи данных, в системе GPRS пакетные приложения используют сетевые ресурсы более эффективно. Пользователям службы обеспечивается возможность выбора параметров качества обслуживания. Кроме того, система GPRS предоставляет услуги широковещания, а также многоадресной и одноадресной передачи. Общая цель этого подхода – обеспечение более эффективной и более дешевой службы с пакетным режимом передачи. Появление системы GPRS вызвано успехом пакетно-ориентированной сети Internet.

Поскольку для технологии GPRS необходимы дополнительные сетевые элементы, т. е. программное и аппаратное обеспечение, то, в отличие от системы HSCSD, для объединения каналов в системе GPRS недостаточно одного лишь обновления программ.

Архитектура системы GPRS содержит новые элементы сети – так называемые узлы поддержки GPRS. Это узел поддержки служб SGSN (Serving GSN) и узел шлюзовой поддержки GGSN (Gateway GSN). Для поддержания работы с интеллектуальными сетями в структуре может быть дополнительный узел CSE (CAMEL Service Environment).

Узлы поддержки связаны с другими элементами интерфейсами, показанными на рис. 45.

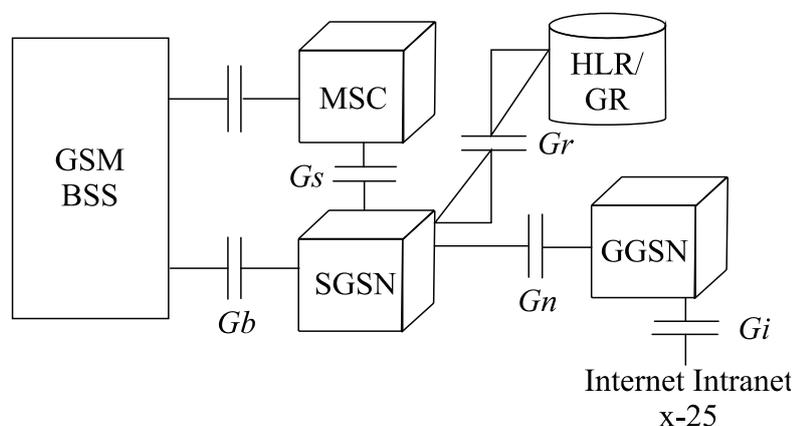


Рис. 45. Интерфейсы GPRS

Узел GGSN связан с внешними сетями через интерфейс *Gi*. Этот узел содержит данные о маршрутизации, выполняет преобразования адресов и с помощью инкапсуляции туннелирует данные пользователям. Передача пакетов узлам SGSN производится через магистральную сеть GPRS (интерфейс *Gn*), основанную на протоколе IP.

Узел SGSN взаимодействует с BSS через интерфейс *Gb*. Узлы SGSN, в частности, запрашивают адреса пользователей из домашнего регистра HLR и отслеживают местонахождение отдельных мобильных станций. Они отвечают за сбор информации об оплате и выполняют несколько функций, связанных с безопасностью (например, контроль доступа). Узлы SGSN взаимодействуют с контроллерами BSC посредством ретрансляции кадров. Они находятся примерно на том же иерархическом уровне, что и центры MSC. В регистре GR, обычно являющемся частью регистра HLR, хранятся все данные, относящиеся к системе GPRS.

Система GPRS основана на следующих идеях (ETSI, 1998б):

– для новых радиоканалов GPRS система GSM может выделить от одного до восьми интервалов кадра TDMA. Они распределены не фиксированным образом, а управляются запросами, т. е. динамически;

– все временные интервалы делятся между активными пользователями, исходящие и нисходящие каналы рассматриваются отдельно. Распределение интервалов зависит от текущей загрузки и предпочтения оператора связи.

В зависимости от схемы кодирования, скорость передачи может достигать 150 кбит/с. В частности, если использовать кодирование каналов с пропускной способностью 14,4 кбит/с, то при выделении всех временных интервалов получится канал со скоростью передачи 115,2 кбит/с. Однако сама идея, положенная в основу системы GPRS, не зависит от характеристик и типа канала и не ограничивает максимальную скорость передачи. Все службы GPRS можно использовать параллельно с традиционными службами.

Система GPRS использует *четыре* схемы канального кодирования данных CS-1–CS-4. Особенностью является то, что система сама меняет схему кодирования в зависимости от условий в радиоканале. Скорости передачи для схем кодирования показаны на рис. 46. Скорости приведены на один тайм-слот.

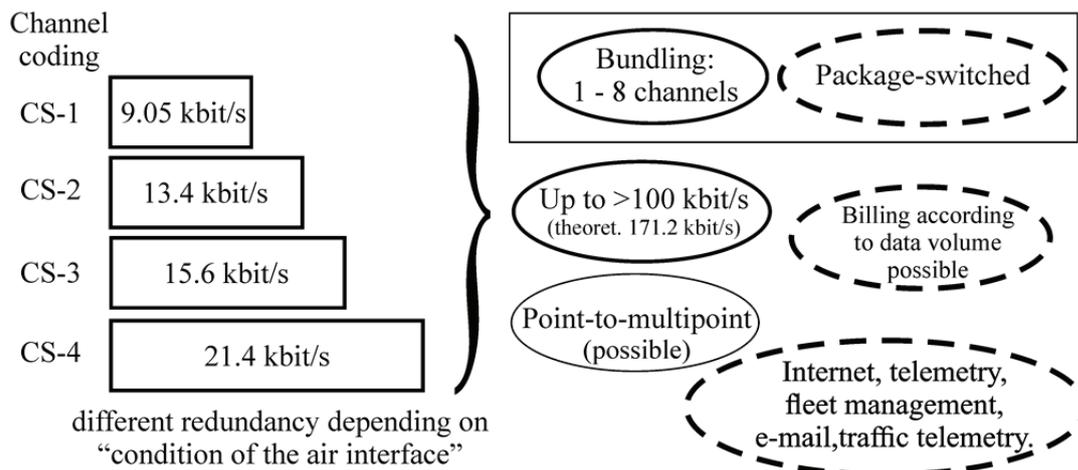


Рис. 46. Скорости при различных схемах кодировки и возможности GPRS

Пользователи системы GPRS могут определять *профиль качества обслуживания*. Он содержит приоритет службы (высокий, средний, низкий), класс надежности, класс задержки передачи и

пропускную способность канала пользовательских данных. Радиоресурсы распределяются так, чтобы удовлетворить эти пользовательские требования.

Система GPRS включает несколько служб безопасности. В ней проводится аутентификация, обеспечивается конфиденциальность пользователя и передаваемой им информации. Возможны даже полностью анонимные услуги, когда оплата взимается независимо от личности пользователя мобильной станции.

Любые данные до передачи через сеть GPRS должны быть закреплены за какой-то мобильной станцией. Это делается с помощью механизмов управления мобильностью. Процедура закрепления включает присвоение временной идентификации логического канала и порядкового номера ключа шифрования, используемого для кодирования данных. Для каждой мобильной станции устанавливается окружение GPRS. Оно сохраняется в мобильной станции и соответствующем узле SGSN.

3.1.3. Технология EDGE

EDGE – это технология передачи данных, которая позволяет предоставить скорости передачи данных до 384 кбит/с. При этом в сеть не вводятся новые элементы, вся инфраструктура остается прежней, за исключением апгрейда некоторых его элементов. Чтобы подчеркнуть то, что различия между системами EDGE и GPRS незначительны, эту технологию еще называют EGPRS (Enhanced GPRS) – улучшенный, расширенный GPRS. Дальнейшее повышение скорости передачи данных было осуществлено путем перехода на новую, более эффективную схему модуляции, без изменения общей ширины спектра канала в 200 кГц. Новая технология получила название EDGE (Enhanced Data rates for the GSM Evolution). В ней используется модуляция 8-PSK, где бит в радиоканале кодируется тремя информационными символами. В результате достигается более высокая скорость передачи 640 кбит/с, против 270,833 кбит/с в обычном радиointерфейсе GSM. На рис. 47 приведены сравнительные значения скоростей EDGE и HSCSD.

Особенностью технологии является динамическое изменение схем модуляции и кодирования в зависимости от состояния радиоканала. Используется девять таких схем: MSC1–MSC9. Причем, в первых четырех схемах применяется модуляция GMSK, а в остальных – 8-PSK.

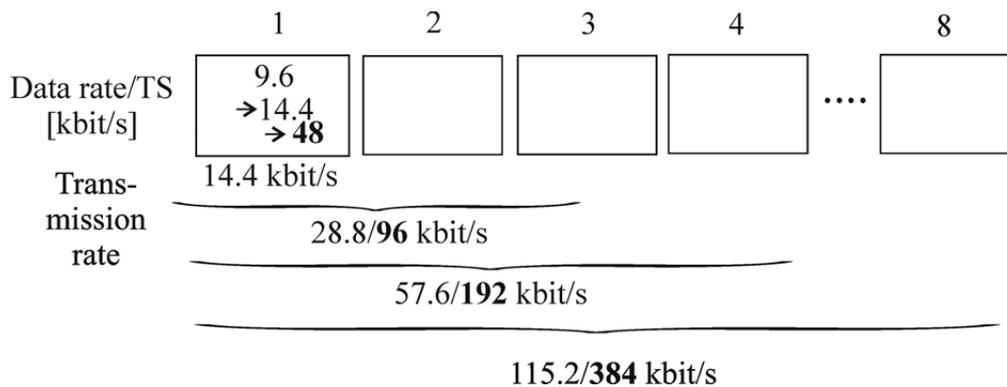


Рис. 47. Сравнение скоростей передачи данных по технологиям EDGE и HSCSD

Внедрение технологии EDGE оказывает влияние лишь на базовые станции. Из-за смены способа модуляции претерпевают изменение приемопередатчики. Для внедрения EDGE необходима полная их замена. Остальные элементы, включая и контроллер базовых станций, требуют только замены программного обеспечения. Важно заметить, что технология EDGE меняет лишь радиointерфейс, сохраняя без изменений структуру сети Фазы 2+.

В рамках международного проекта IMT-2000 технология EDGE отнесена к поколению 3G сотовой связи.

Вопросы для самопроверки

1. Какие технологии сотовой связи применялись между поколениями 2G и 3G?
2. За счет чего выросла скорость радиопередачи в технологии HSCSD по сравнению с технологией TDMA?
3. Какие новые услуги предложила система GPRS?
4. Какие новые элементы сети содержит система GPRS по сравнению с GSM?
5. Как организована функция безопасности в GPRS?
6. За счет чего возросла скорость передачи данных в технологии EDGE по сравнению с предыдущими технологиями?

3.2. Семейство систем IMT-2000

IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications – 2000*) – это рекомендации, разработанные Международным Институтом Электросвязи (ITU), касающиеся вопросов использования частотного спектра и технических особенностей для всего семейства

стандартов третьего поколения. Рекомендации описывают пути эволюции существующих в мире стандартов второго поколения в стандарты третьего поколения.

Согласно рекомендациям ИТУ определено пять стандартов мобильной связи третьего поколения. Вместе эти пять стандартов образуют семейство систем IMT-2000 (рис. 48).

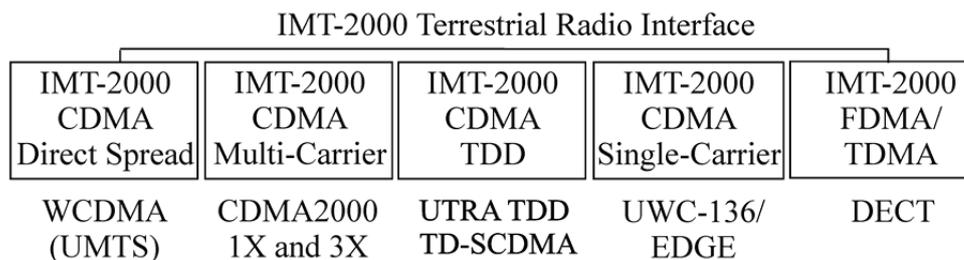


Рис. 48. Семейство систем IMT-2000

Технология IMT-2000 – это фактически всем известный стандарт 3G. Данная аббревиатура объединяет пять стандартов, или 3G-решений: CDMA2000, W-CDMA, TD-CDMA/TD-SCDMA, UWC-136 и DECT. Из них полноценно работают и обеспечивают полное покрытие только первые три.

IMT-2000 обеспечивает:

- высокую скорость передачи данных как внутри помещений, так и на открытой местности;
- симметричную и асимметричную передачу данных;
- поддержку канальной и пакетной коммутации для обеспечения таких сервисов, как Internet Protocol (IP) и Real Time Video (видео в режиме реального времени);
- высокое качество голоса, не уступающее качеству голоса при передаче по проводной линии;
- большую компактность спектра и более эффективное его использование;
- возможность глобального роуминга.

Программа IMT-2000 базируется на ряде признаков, определяющих принципы построения систем третьего поколения и их архитектуру. Они должны обеспечивать определенные значения скорости передачи для различных степеней мобильности абонента (т. е. разных скоростей его движения) в зависимости от величины зоны покрытия:

– до 2,048 Мбит/с при низкой мобильности (скорость менее 3 км/ч) и локальной зоне покрытия;

– до 144 кбит/с при высокой мобильности (до 120 км/ч) и широкой зоне покрытия;

– до 64 (144) кбит/с при глобальном покрытии (спутниковая связь).

Что же касается набора услуг, то он фактически приближается к предоставляемому в сетях фиксированной связи. Это и высокоскоростной доступ в Internet, и мультимедиа. Достижение таких высоких скоростей при ограниченном частотном ресурсе и работе в каналах с замираниями потребовало разработки принципиально новых подходов к построению радиоинтерфейса.

Архитектура систем включает два основных элемента: сетевую инфраструктуру (Access Network) и магистральные базовые сети (Core Network). Такая структура обеспечивает возможность наращивания инфраструктуры путем последовательной модификации ее составных элементов.

С учетом специфики сетей сотовой связи были разработаны варианты миграции этих сетей в сети третьего поколения, показанные на рис. 49.

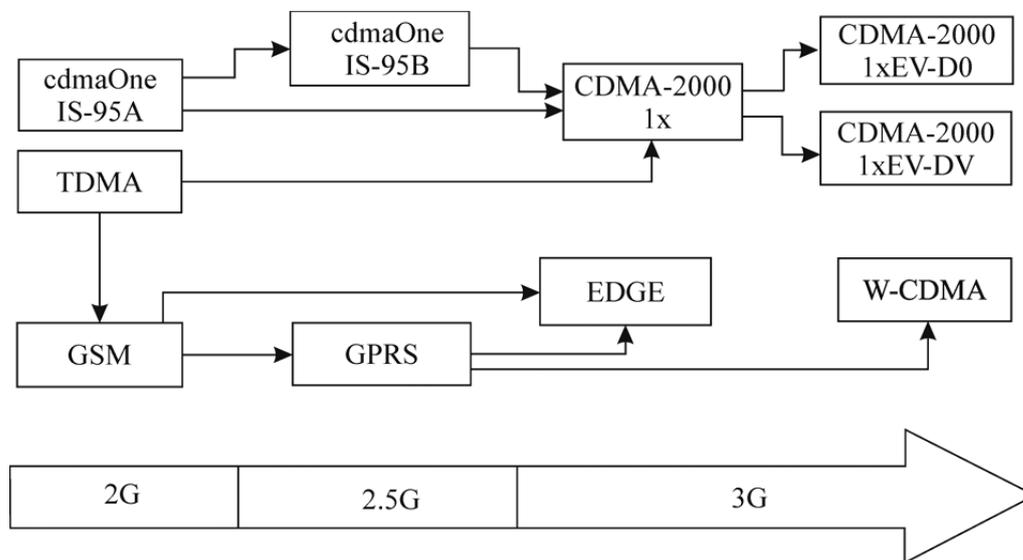


Рис. 49. Миграция стандартов сотовой связи в сети третьего поколения

В борьбе за лидерство при принятии мировых стандартов третьего поколения образовались два партнерских объединения: 3GPP и 3GPP2.

В первое объединение 3GPP вошли ETSI (Европа), ARIB (Япония), Комитет T1 (США), а также три региональных органа стандартизации от Азиатско-Тихоокеанского региона – CWTS (Китай), TTA (Корея) и TTC (Япония).

3GPP2 (Third Generation Partnership Project 2) – это партнерство стандартизирующих организаций Северной Америки и Азии, созданное для разработки стандарта сотовой связи третьего поколения, который бы учитывал особенности развития сотовой связи в их регионах.

3.2.1. CDMA2000

Стандарт CDMA2000 (американский сотовый оператор Qualcomm) – основной конкурент UMTS в Европе. CDMA2000 имеет две ступени развития, известных как 1X и 3X. В рамках первой ступени скорость передачи данных достигает 144 Кбит/с, в рамках второй – 2 Мбит/с. В ходе дальнейшего эволюционного развития технологии разработчики стремятся передачу данных и голоса интегрировать и осуществлять в одном частотном диапазоне.

Для этого сделаны следующие изменения:

- обновлено программное обеспечение на элементах системы коммутации с целью поддержки процедуры аутентификации и авторизации пакетных соединений;

- обновлено аппаратное обеспечение для базовых станций в связи с существенными изменениями в радиоинтерфейсе;

- заменен приемопередатчик мобильного терминала, по тем же причинам;

- обновлено программное обеспечение для контроллера базовых станций, в результате чего он маршрутизирует пакеты к новой сети с коммутацией пакетов;

- введена новая сеть с коммутацией пакетов. В нее входит непосредственно пакетный коммутатор, а также элемент, обеспечивающий аутентификацию абонентов, пользующихся услугами этой сети.

За счет того, что спектр и качество предоставляемых сетью CDMA2000 услуг расширились, в структуре сети появились некоторые новые элементы, а функции прежних претерпели изменение (рис. 50). Ниже представлены новые элементы сети и рассмотрены их основные функции.

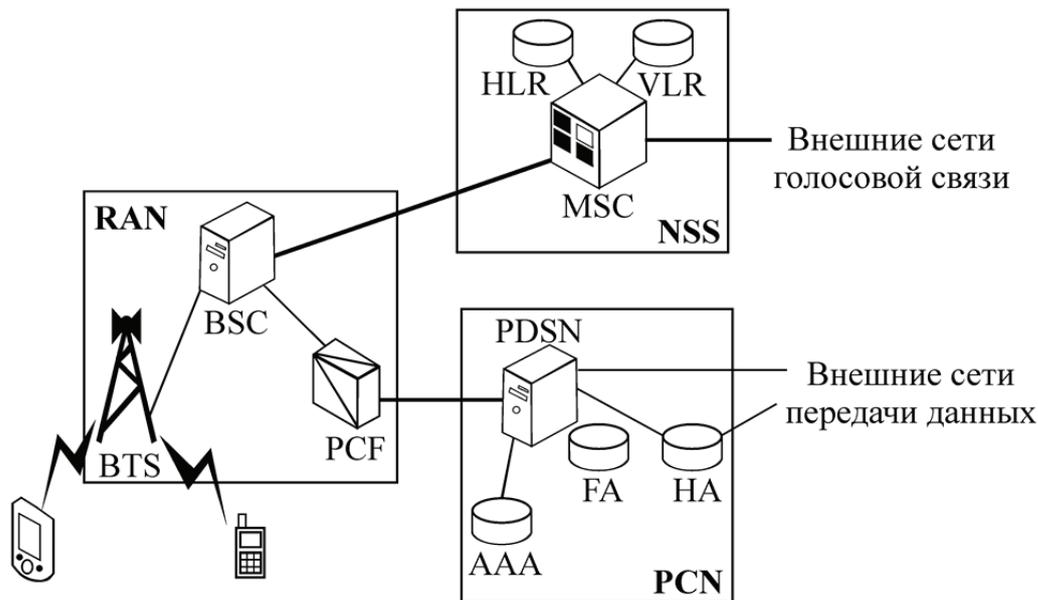


Рис. 50. Структура сети CDMA2000

Базовая станция (BTS) – контролирует все действия на радиointерфейсе между BTS и MS, а также служит интерфейсом между сетью и мобильными устройствами. Управление радиоресурсами, например, назначение частотных каналов, разделение сот, управление мощностью передачи и т. п., относится к задачам базовой станции. В дополнение к этому, BTS организует сквозные соединения для прохождения трафика между MS и BSC для обеспечения минимальных временных задержек в процессе передачи пользовательских данных и сигнализации.

Контроллер базовых станций (BSC) – передает сообщения сигнализации и голосовые данные между сотами и центром коммутации (MSC). Кроме того, BSC выполняет некоторые процедуры, связанные с мобильностью абонентов, например, контролирует процедуру хэндовера между сотами в случае необходимости.

Устройство контроля пакетных соединений (PCF) – новый элемент сети CDMA2000. Его главной задачей является маршрутизация пакетов между BTS и внешними сетями. В процессе пакетной сессии PCF назначает доступные радиоресурсы для абонентов сети, в соответствии с их потребностями и оплаченным объемом услуг. Главная задача PCF заключается в планировании распределения ресурсов сети доступа, включая радио-

ресурсы, так чтобы они могли быть максимально эффективно использованы и при этом не допустить снижения качества предоставляемых услуг.

Сеть коммутации (NSS) не претерпела существенных изменений. В нее входят MSC, который отвечает за установление голосовых соединений в системе, а также ряд регистров (HLR, VLR и др.), в которых хранится информация об абонентах.

Сеть пакетной коммутации (PCN) – это совершенно новая система в сети сотовой связи, отвечающая за передачу пользовательских пакетов из внешних сетей или во внешние сети, а также за аутентификацию абонентов, назначение IP-адресов и некоторые другие.

Обслуживающий узел пакетной сети, объединенный с внешним агентом (PDSN/FA) – это шлюз между сетью радиодоступа и внешними пакетными сетями. Это устройство выполняет следующие функции:

AAA-сервер используется для проведения процедур аутентификации и авторизации абонентов, а также для хранения абонентских данных с целью биллинга и выставления счетов.

Домашний агент (HA) предоставляет бесшовный роуминг к другим сетям стандарта CDMA2000. HA предоставляет якорный IP-адрес для MS, служащий для передачи любых пользовательских данных через исходную сеть. Кроме того, домашний агент поддерживает регистрацию абонентов, передачу пакетов к PDSN, а также (опционально) создание защищенного соединения.

С появлением стандарта CDMA2000 первой фазы, следом началась разработка последующих поколений данного стандарта. В результате проведенной работы организацией 3GPP2 в 2002 г. был выпущен стандарт CDMA2000 1x-EV-DO (evolution data only), который предлагал скорости передачи данных до 2,4 Мбит/с, что в 20 раз выше, чем предыдущий стандарт. Такое достижение было сделано в первую очередь за счет внедрения новых технологий на радиointерфейсе. В частности, наряду с кодовым разделением каналов был внедрен метод TDMA. При этом для каждого абонента выделялся отдельный таймслот, который предотвращал возможность возникновения интерференции в соте.

Благодаря дальнейшим разработкам, более поздние релизы стандарта CDMA2000 1x-EV-DO позволяли использовать одновременно несколько таймслотов и несущих, что увеличивало мак-

симальную скорость передачи данных, приближая их к показателям стандартов поколения 4G.

Разработанный в 2003 г. стандарт CDMA2000 1x-EV-DV (Evolution Data/Voice) предполагал возможность одновременной передачи в радиоэфире на одной несущей и голоса, и данных. Однако такая концепция не нашла существенного развития в связи с развитием направления ALL-IP, которое предусматривало передачу голоса по сетям с IP-коммутиацией.

В Беларуси в 2003 г. компания «БелСел» начала коммерческую эксплуатацию в стандарте CDMA2000 в частотном диапазоне 450 МГц. Услуги CDMA2000 предоставлялись под торговой маркой DIALOG. В 2013 г. сети CDMA2000 были свернуты.

3.2.2. Стандарт UMTS

3.2.2.1. Общая характеристика. Стандарт UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – универсальная система мобильной связи) нашел наибольшее распространение среди других стандартов этого поколения на территории Европы, в том числе Беларуси и России. В качестве метода передачи данных через воздушное пространство используется технология W-CDMA, которая позволяет поддерживать скорость передачи информации теоретически до 21 Мбит/с (при использовании HSPA+). Благодаря технологии HSDPA (High Speed Downlink Packet Access, 3,5G), которая была внедрена в 2006 г., максимальная скорость возросла до 14 Мбит/с. Эти и другие преимущества UMTS позволили предоставлять абонентам широкий перечень услуг: видеозвонки, видеоконференции, высококачественные голосовые звонки, загрузку файлов с высокой скоростью, сетевые игры, мобильную коммерцию и др.

Наземная часть UMTS известна как UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access). Радиоинтерфейс UMTS, получивший название UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network), основан на кодовом разделении и практически не имеет ничего общего с физическим уровнем GSM. Сети GSM не могут быть модернизированы для работы с W-CDMA, хотя некоторые компоненты системы GSM, такие как услуга пакетной радиопередачи GPRS, могут многократно транслироваться через сеть CDMA.

Ширина полосы, которая отводится для одного канала W-CDMA, равна 5 МГц. Возможно увеличение полосы до 10 МГц и

далее до 20 МГц. Это в четыре раза больше, чем в cdmaOne, и в десятки раз больше, чем в GSM.

Другое главное отличие W-CDMA от cdmaOne – отсутствие потребности в синхронизации времени. W-CDMA был разработан для того, чтобы работать без сигналов синхронизации от глобальной навигационной системы GPS.

Имеются различия в кодировании: в W-CDMA для кодирования используются не коды Уолша, а коды Голда. Для передачи в канал они объединяются с помощью той же модуляции, что и в cdmaOne. Все это позволяет передавать данные с максимальной скоростью приблизительно 2,048 Мбит/с в пределах одной соты.

Каждый канал повторно используется каждой сотой, повышая спектральную эффективность по сравнению с системами TDMA.

W-CDMA предоставляет возможность мягкого хэндовера, но при взаимодействии с GSM такой тип хэндовера не поддерживается.

3.2.2.2. Структура сети. Система UMTS использует ту же хорошо известную архитектуру, которая применяется во всех основных системах второго поколения и даже в некоторых системах первого поколения. Она состоит из ряда логических элементов сети, каждый из которых выполняет определенные функции. В стандартах элементы сети определяются на логическом уровне, и это очень часто приводит к похожей физической реализации, особенно в силу того, что имеется несколько открытых интерфейсов (чтобы интерфейс был «открытым», существует требование, чтобы он был определен на уровне такой детализации, что оборудование в конечных точках может быть поставлено разными изготовителями). Элементы сети могут группироваться на основе близости выполняемых функций или на основе подсети, к которой они принадлежат.

По своим функциям элементы сети группируются в сеть радиодоступа (RAN, UMTS территориального уровня = UTRAN), которая оперирует всеми функциями, относящимися к радиосвязи, и в базовую сеть (CN – Core Network), которая обеспечивает коммутацию и маршрутизацию вызовов, и каналы передачи данных во внешние сети. Чтобы завершить систему, определяются оборудование пользователя (UE), которое взаимодействует с ним, и радиоинтерфейс (Uu).

Структура сети стандарта UMTS представлена на рис. 51.

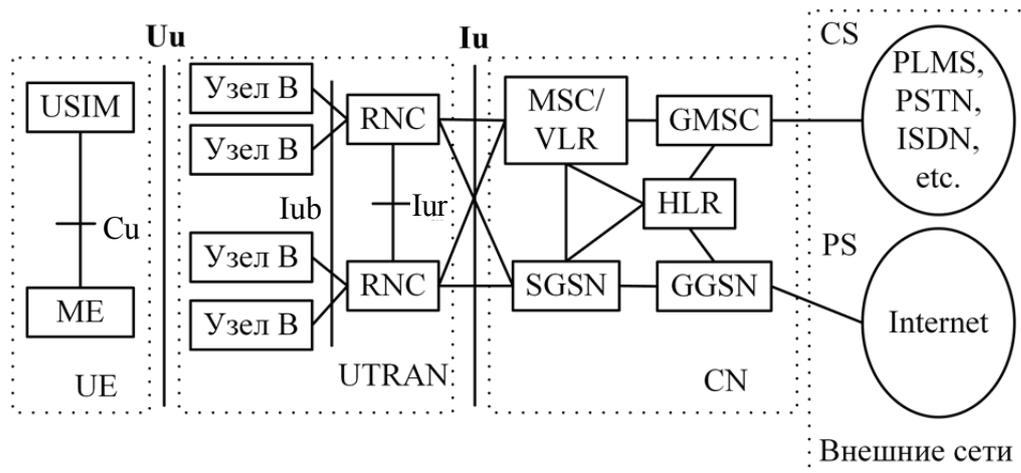


Рис. 51. Структура сети стандарта UMTS

Система UMTS является модульной в том смысле, что возможно иметь несколько элементов сети одного и того же типа, работающих либо самостоятельно, либо вместе с другими подсетями, и которые являются тождественными друг другу. Такая сеть называется UMTS PLMN (наземная мобильная сеть общего пользования). Обычно одна PLMN эксплуатируется одним оператором и соединяется с другими PLMN также, как и с другими типами сетей, например, ISDN, PSTN, Интернет и т. д.

UE содержит следующие две составляющие:

- мобильное оборудование (ME) – радиотерминал, используемый для радиосвязи через интерфейс Uu;
- модуль идентификации абонента UMTS (USIM), представляющий собой интеллектуальную плату; она служит идентификатором абонента, выполняет алгоритм аутентификации и шифрования и некоторые данные об услугах, необходимые при пользовании терминалом.

В отличие от предшествующих стандартов UE в UMTS может быть не только обычный телефон, но и смартфон, ноутбук, стационарный компьютер и т. п.

UTRAN, относящаяся к подсистеме БС, также состоит из двух элементов:

- узла В;
- контроллера радиосети (RNC).

В сети UMTS по сравнению с сетью GSM наибольшие изменения претерпела подсистема БС. Отмеченные выше преимуще-

ства достигаются в первую очередь за счет новой технологии передачи информации между БС и телефоном абонента.

Узел В. Основная функция узла В состоит в осуществлении обработки в воздушном интерфейсе (канальное кодирование и перемежение, адаптация скорости, расширение спектра и т. д.). Кроме того, узел В выполняет одну из основных операций по управлению радио-ресурсами – управление мощностью во внутреннем контуре. Логически он соответствует БС в системе GSM. Термин «Узел В» был вначале принят в качестве временного термина в процессе стандартизации, но затем так и не поменялся.

Контроллер радиосети. RNC могут соединяться друг с другом через интерфейс Iur. RNC и узлы В соединяются с помощью интерфейса Iub.

Основные характеристики UTRAN:

- поддержка UTRA и всех относящихся к нему функций. В частности, основное воздействие на построение UTRAN оказало требование обеспечения мягкого хэндовера (один терминал подключается к сети с участием двух или большего числа активных ячеек) и ориентированных на W-CDMA алгоритмов управления радио-ресурсами;

- максимизация унификации при обработке данных с коммутацией пакетов и с коммутацией каналов при использовании уникального пакета протоколов воздушного интерфейса и при использовании одного и того же интерфейса для соединения UTRAN с областями обслуживания (доменами) как PS, так и CS базовой сети;

- максимизация, по возможности, общности с GSM;

- использование транспортного протокола АТМ в качестве основного транспортного механизма в UTRAN.

RNC представляет собой элемент, обеспечивающий управление радио-ресурсами в UTRAN. Он сопрягается с CN (обычно с одним MSC и одним SGSN), а также реализует протокол RRC (управления радио-ресурсами), который определяет сообщения и процедуры между UE и UTRAN. Логически он соответствует BSC (контроллеру БС) в GSM.

RNC, руководящий одним узлом В, обозначается как управляющий RNC узла В. Управляющий RNC отвечает за контроль за нагрузкой и перегрузкой в собственных ячейках, а также осуществляет управление доступом и выделение кодов для новых радиоканалов, которые будут устанавливаться в этих ячейках.

Основными элементами базовой сети CN являются следующие:

1) HLR – это база данных, помещаемая в домашнюю систему абонента, которая хранит в памяти основной экземпляр профиля обслуживания абонента. Профиль обслуживания содержит, например, информацию о предоставляемых ему услугах, запрещенных районах роуминга и дополнительную сервисную информацию, например, о возможности переключения телефонного вызова и номера телефона, на который производится переадресация. Профиль обслуживания создается, когда новый абонент прописывается в системе, и остается в памяти до тех пор, пока сохраняется эта прописка. Для маршрутизации входящих сообщений к UE HLR также записывает данные о местоположении UE на уровне системы обслуживания;

2) MSC/VLR – это коммутатор (MSC) и база данных (VLR), которые предоставляют услуги по текущему местоположению UE по коммутации каналов (CS – Circuit Switched). Функция MSC используется для коммутации сообщений CS, и функция VLR сохраняет экземпляр профиля обслуживания гостевого пользователя, а также более точную информацию о местоположении UE в системе обслуживания. Часть сети, к которой обеспечивается доступ через MSC/VLR, часто называют областью обслуживания CS;

3) GMSC (шлюзовой MSC) – это коммутатор в точке, где UMTS PLMN соединяются с внешними сетями CS. Все входящие и исходящие соединения CS проходят через GMSC.

Функции SGSN (узла по обеспечению услуг GPRS) подобны функциям MSC/VLR, но обычно используются для услуг с коммутацией пакетов (PS). Часть сети, к которой обеспечивается доступ через MSC/VLR, часто называют областью обслуживания CS.

GGSN (узел по обеспечению межсетевого перехода GPRS) функционально близок к GMSC, но связан с предоставлением услуг PS.

Внешние сети можно разделить на две группы:

– сети CS. Они обеспечивают соединения с коммутацией каналов, как это имеет место в существующей в настоящее время телефонной связи;

– сети PS. Они обеспечивают соединения с коммутацией пакетов данных. Одним из примеров сети PS служит Интернет.

Стандарты UMTS построены таким образом, что функции внутри элементов сети подробно не определяются. Вместо этого

определены интерфейсы между логическими элементами сети. Выделяют следующие основные открытые интерфейсы:

- интерфейс *Cu*. Это электрический интерфейс между интеллектуальной платой (смарт-карточкой) USIM и ME. Интерфейс удовлетворяет формату стандарта для смарт-карточек;

- интерфейс *Uu*. Это радио-интерфейс WCDMA, через который UE получает доступ к стационарной части системы, и поэтому, возможно самый важный интерфейс в UMTS;

- интерфейс *Iu*. Он соединяет UTRAN с CN. Подобно соответствующим интерфейсам в GSM, открытый интерфейс *Iu* дает операторам UMTS возможность производить закупку UTRAN и CN у разных производителей. Создание конкуренции в этой области явилось одним из факторов, обусловивших успех GSM;

- интерфейс *Iur*. Открытый интерфейс *Iur* позволяет осуществлять мягкий хэндовер между RNC от различных производителей, и поэтому он дополняет открытый интерфейс *Iu*;

- интерфейс *Iub*. *Iub* соединяет узел B и RNC. UMTS является первой коммерческой системой подвижной телефонной связи, где интерфейс контроллер-БС стандартизован как полностью открытый интерфейс.

3.2.2.3. Канальная структура. В стандартах UTRA и W-CDMA в отличие от CDMA2000 предложен иной принцип деления каналов, основанный на учете взаимосвязи между объектами разных иерархических уровней. Иерархическая трехуровневая структура ориентирована на предоставление различных видов услуг, включая передачу речи, данных и мультимедиа. Для их реализации на канальном уровне создается множество логических каналов, функционирующих с различными показателями качества сервиса, при этом физический канал может адаптивно подстраиваться под требуемые режимы обслуживания.

Выделяют три типа каналов:

- логические, обслуживаемые на подуровне L2/LAC и обеспечивающие взаимодействие между протоколами L2/MAC и более высокими уровнями;

- транспортные, обслуживаемые на подуровне L2/MAC и обеспечивающие взаимодействие между протоколами физического и более высоких уровней;

- физические, формируемые на самом нижнем уровне L1.

Понятие «логический канал» относится к уровням выше физического и отражает содержание данных, предназначенных для передачи (обмен сообщениями с потребителем или команды управления).

Термин «транспортный канал» относится к способу и формату данных, передаваемых далее по физическим каналам.

В свою очередь, специфические частота и кодовая последовательность, обеспечивающие соединение между БС и МС, задают тот или иной физический канал.

Информация, структурированная в транспортных каналах, далее проектируется на физические каналы, по которым передается «вниз» и «вверх».

Классификационный признак, относящийся как к физическим, так и транспортным каналам UMTS: и те, и другие делятся на выделенные и общие.

Выделенные транспортные каналы (по одному на каждого пользователя) содержат данные обмена между конкретным потребителем и сетью, а также сигналы управления.

Общие транспортные каналы служат для передачи системной информации, данных о конфигурации сети и параметрах соты, сигналов вызова, пакетных сообщений и др.

Все физические каналы имеют стандартизованную временную структуру. Каждый канал делится на кадры длительностью 10 мс (38 400 чипов). Каждый кадр состоит из 15 слотов, имеющих длительность 666,6... мкс (2560 чипов). Распределение данных между слотами и в пределах слота варьируется в зависимости от типа физического канала и текущей скорости передачи данных.

Существуют две группы логических каналов: управления ССН и трафика ТСН. По каналам управления передаются вызывные и служебные сообщения, сигнализация, команды управления мощностью и диаграммой направленности, а по каналу трафика – информационные потоки.

Двусторонняя радиосвязь между БС и МС осуществляется по двум каналам. В сетях с коммутацией каналов данные передаются по выделенному каналу трафика (DTCH, Dedicated TCH), а пакетная информация – по каналу передачи абонентских пакетов (UPCH, User Packet Channel).

Одно из различий между проектами W-CDMA и UTRA состоит в разном числе типов выделенных каналов. В W-CDMA один тип – DTCH, а в UTRA их целых три: DTCH, автономный

(SDCCH, Stand-alone DCCH) и совмещенный (ACCH, Associated CCH). В канале DTCH предусмотрено быстрое изменение скорости передачи (каждые 10 мс). ACCH используется для совместной передачи управляющей информации из потока данных.

Физические каналы определяют качественные показатели и режимы передачи информации. Их главные характеристики – код, частота и фазовый сдвиг. Они также подразделяются на общие (CPCN, Common Physical Channel) и выделенные (DPCN, Dedicated Physical Channel) каналы. По общему каналу управления CCPCH передается вызывная управляющая информация. Для передачи символов пилот-сигнала используется отдельный канал синхронизации (SCH, Synchronization Channel).

Для организации связи с конкретным пользователем выделен специальный канал DPCN, по которому передаются как информация абонента, так и управляющие сигналы, вспомогательные пилот-символы управления диаграммой направленности антенны, а также биты управления мощностью и прочие служебные данные.

Уникальность технологии CDMA состоит в том, что каждый логический канал отображается на физический «индивидуально», с присущими ему скоростью передачи и кодом.

UMTS использует транспортный механизм W-CDMA для транспортировки информации. Каждый канал занимает диапазон 5 МГц. Для передачи информации от узла В к UE и в обратном направлении применяются различные способы модуляции. Для передачи от узла В к UE применяется квадратурно-фазовая манипуляция (QPSK). Для передачи в обратном направлении используются два отдельных канала для того, чтобы прямые и обратные линии передачи речи не влияли друг на друга. Эта проблема была обнаружена в GSM. Для образования двойного канала используются специальные модуляторы-демодуляторы, работающие на основе DQPSK (дифференциальной QPSK). При квадратурной модуляции для передачи по каждому из каналов используются различные фазы модуляции (I и Q) или квадратурный выход модулятора.

3.2.2.4. Технология HSDPA. HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) – это технология высокоскоростной передачи данных «вниз». Наряду с HSUPA входит в семейство технологий высокоскоростной передачи данных HSPA (High Speed Packet Access) для сетей сотовой связи стандарта UMTS. Максимально поддерживаемая скорость, которая может быть достигнута

только в лабораторных условиях, составляет 14,4 Мбит/с. Метод для увеличения скорости передачи данных был позаимствован из стандарта GSM. Технология EDGE в свое время уже позволила увеличить скорость передачи данных в сетях второго поколения более чем в 2 раза, по сравнению с технологией GPRS, лишь за счет нового способа модуляции. В технологии HSDPA также применяется новый метод модуляции на радио-интерфейсе (между узлом В и UE) – 16-QAM (Quadrature amplitude modulation). В одной посылке сигнала, благодаря этому способу модуляции, теперь может передаваться в 3 раза больше информации.

В отличие от GPRS/EDGE, это не единственное важное изменение. Наряду с новым методом модуляции сигнала HSDPA предусматривает также использование скоростной системы автоматических перезапросов HARQ (Hybrid automatic repeat request). Этот механизм отвечает за автоматический перезапрос потерянных или испорченных ошибками пакетов. На практике известно, что наибольшим мешающим воздействиям (помехам, искажениям) информационный сигнал подвержен на интерфейсе между UE и узлом В, а далее до RNC сигнал передается в системах связи (радиорелейной линии связи, волоконно-оптической линии связи и т. п.), которые меньше подвержены внешним воздействиям и, как правило, имеют собственные механизмы защиты от помех. В связи с этим оказалось целесообразно запрашивать искаженные пакеты в узел В, что значительно сократило ожидание повторной передачи. Сами пакеты были уменьшены в размерах в 10 раз, что также способствовало сокращению времени ожидания. Кроме того, на радио-интерфейсе были введены специальные каналы, которые обладают специфическими особенностями, способствующими увеличению скорости передачи данных.

Все эти нововведения позволили увеличить скорость передачи данных в направлении «вниз» более чем в 7 раз. На практике скорости передачи данных могут легко достигать значений около 2 Мбит/с. Этого вполне достаточно для загрузки файлов больших объемов и просмотра потокового видео высокой четкости (HDTV).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое IMT-2000?
2. Какие два основных элемента включает архитектура систем IMT-2000?

3. Для чего служит подсеть радиодоступа в архитектуре сети CDMA2000?
4. Для чего предназначено устройство контроля пакетных соединений в CDMA2000?
5. Каково назначение AAA-сервера?
6. Чему равна ширина полосы одного канала W-CDMA?
7. Назовите основные элементы сети UMTS. В чем основные отличия структуры системы UMTS от стандарта второго поколения GSM?
8. Какие типы каналов выделяют в стандартах UTRA и W-CDMA?
9. Перечислите основные интерфейсы между логическими элементами сети UMTS.
10. В чем заключается новый метод модуляции на радиointерфейсе в технологии HSDPA?

РАЗДЕЛ 4

СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПОКОЛЕНИЯ 4G

Международный союз электросвязи в рамках ИМТ-2000 опубликовал рекомендации по определению технологий, отвечающих требованиям ИМТ-Advanced относительно 4G-поколения мобильных технологий. К настоящим 4G-технологиям можно отнести только продвинутые версии WiMax и LTE – LTE Advanced и IEEE 802.16m WiMax.

Стандарты LTE и WiMax имеют много общего. В частности, в обоих стандартах используется технология OFDMA (Orthogonal Frequency-division Multiplexing) и технология передачи данных MIMO (Multiple Input Multiple Output), а также частотное разделение сигналов FDD (Frequency Division Duplex) и TDD (Time Division Duplex) дуплексирование при пропускной полосе канала до 20 МГц. Обе системы связи используют протокол IP, успешно применяют свой диапазон частот и обеспечивают клиентам измеримую скорость передачи данных при работе в сети интернет.

Первоначально WiMax рассматривался как продвинутая замена стационарного доступа в интернет. WiMax изначально создавался как «длинный Wi-Fi» и замена кабельного доступа, в то время как стандарт LTE – дальнейшее развитие современных сотовых сетей.

4.1. Сравнение стандартов LTE и WiMax

Проведем сравнительный анализ стандартов LTE-Advanced (LTE-A) и Wireless MAN-Advanced (WiMax-2), исходя из перечисленных ниже технических характеристик беспроводных сетей связи, определяющих их эффективность и качество предоставляемых услуг:

- диапазон частот, в пределах которого рекомендовано МСЭ и разрешено Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) развертывание беспроводной сети связи;

- максимальная спектральная эффективность (бит/с/Гц) – отношение максимальной скорости передачи информации к используемой полосе частот; определяется для линии связи от БС к абоненту и от абонента к БС;

– латентность сети – время подготовки к передаче информации по каналу связи, включающее в себя время перехода абонентского оборудования из режима ожидания в активный режим передачи данных (C-plane), и время, через которое данные от абонентского оборудования поступят на БС (U-plane);

– длительность хэндовера – время переключения активного соединения с одного канала на другой: а) внутри одной и той же несущей частоты; б) между двумя разными несущими в одной полосе частот; в) между двумя разными несущими, расположенными в разных полосах частот.

Следует отметить, что кроме традиционной оценки максимальной спектральной эффективности (бит/с/Гц) существуют и другие подходы к расчету этого показателя. Например, спектральная эффективность часто определяется как отношение скорости передачи данных всех абонентов сети в определенной географической области (в соте или на границе соты) к используемой полосе частот.

Основные технические характеристики сетей связи четвертого поколения приведены в табл. 5, из которой следует, что стандарты LTE-A и WiMax-2 являются практически равноценными по большинству параметров.

Таблица 5

Основные технические характеристики стандартов 4G

Показатель	LTE-A	WiMax-2
Диапазон частот, МГц	791–821; 832–862; 880–915; 925–960; 1710–1785; 1805–1880; 2300–2400; 2500–2690;	2300–2400; 2500–2690; 3400–3600
Максимальная спектральная эффективность, бит/с/Гц	Downlink: 16,3 Uplink: 8,4	Downlink: 16,3 Uplink: 8,4
Спектральная эффективность соты, бит/с/Гц/сота	Downlink: 2,4–3,8 Uplink: 1,5–2,1	Downlink: 2,6 Uplink: 1,3
Спектральная эффективность на границе соты, бит/с/Гц/граница соты	Downlink: 0,066–0,1 Uplink: 0,062–0,099	Downlink: 0,09 Uplink: 0,05
Латентность сети, мс	C-plane: 50; U-plane: 4	C-plane: 100; U-plane: 10
Длительность хэндовера, мс	Во всех режимах: 10,5	Внутри несущей: 27,5; между несущими в полосе: 40; между полосами: 60

Кроме того, оба стандарта поддерживают схему MIMO с обратной связью, при использовании которой в приемнике оцениваются характеристики канала распространения радиоволн, после чего информация о характеристиках канала посылается от приемника к передатчику. Это позволяет сформировать оптимальные диаграммы направленности многоэлементных антенн на передающей и приемной сторонах, так чтобы пространственные каналы наименьшим образом интерферировали между собой, что значительно повышает энергетический бюджет соединения.

Таким образом, технологии LTE-A и WiMax-2 теоретически позволяют обеспечить сравнимую скорость передачи информации. С другой стороны, рассматриваемые технологии имеют некоторые отличия:

– базовая структура сети WiMax основана на использовании трех частотных каналов и трехсекторной конфигурации сот. При этом в каждом из секторов сети WiMax используется один из трех частотных каналов (коэффициент переиспользования частот равен 3);

– коэффициент переиспользования частот для базовой структуры сети LTE равен 1, т. е. все БС работают на одной несущей. В этом случае внутрисистемные помехи минимизируются с помощью гибкого частотного плана. Для пользователей в центре любой соты могут выделяться ресурсы из всей полосы канала; таким образом технология LTE более эффективно использует выделенный спектр, чем WiMax. Пользователям на краях сот выделяются разные частотные блоки, что позволяет минимизировать внутрисистемные помехи.

Инфраструктура сетей WiMax более простая, чем сетей LTE и, следовательно, более надежная технически. С другой стороны, сети LTE совместимы со стандартами сотовой связи предыдущих поколений – GSM и UMTS. Например, сети LTE могут использовать для передачи речи ресурсы сетей GSM и UMTS, которые практически повсеместно внедрены на территории Беларуси. Благодаря описанным выше достоинствам технология LTE в настоящее время используется многими операторами связи для построения сетей 4G на территории Беларуси. Технология WiMax, в свою очередь, так и не получила широкого распространения.

Вопросы для самопроверки

1. Какие способы оценки спектральной эффективности Вы знаете?
2. По каким параметрам сравнения стандарты LTE-A и WiMax-2 являются практически равноценными?

3. Какие идентичные технологии применяются в обоих стандартах LTE и WiMax?
4. Что такое C-plane и U-plane?
5. На чем основана базовая структура сети WiMax?
6. На чем основана базовая структура сети LTE?
7. Совместимы ли сети поколения 4G с сетями предыдущих поколений?

4.2. Технологии 4G

4.2.1. Технология OFDMA

Ортогональный многостанционный доступ с частотным разделением каналов OFDMA базируется на системе мультиплексирования OFDM. Ортогональное частотное разделение каналов (OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) – методика мультиплексирования, которая разделяет полосу канала на множество поднесущих частот, как показано на рис. 52.

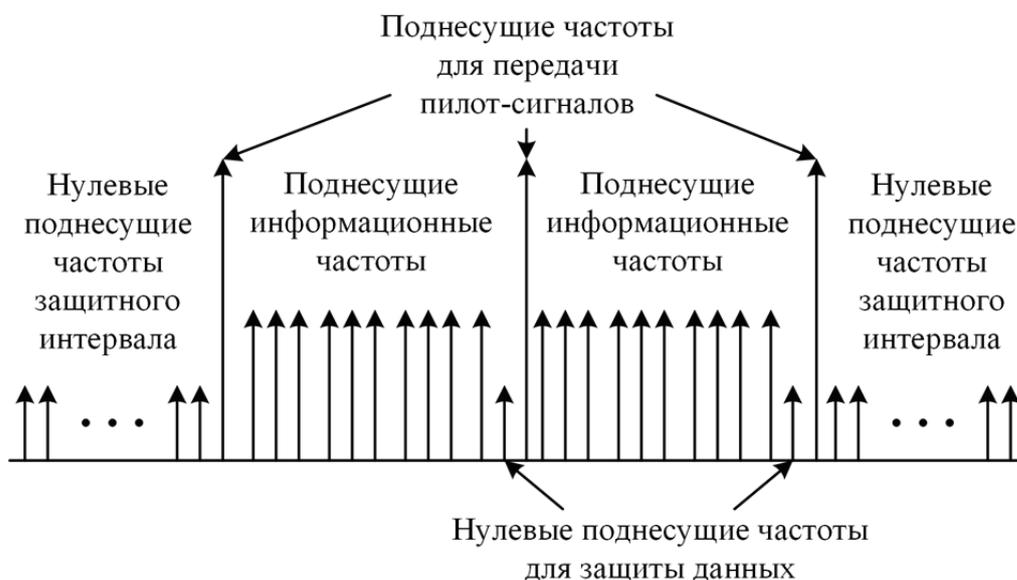


Рис. 52. Распределение поднесущих частот

В системе OFDM входной поток данных разделен на несколько параллельных подпотоков с уменьшенной скоростью передачи данных (с увеличением продолжительности каждого передаваемого на этой частоте знака). Каждый подпоток модулируется и передается на отдельной ортогональной поднесущей частоте (рис. 53).

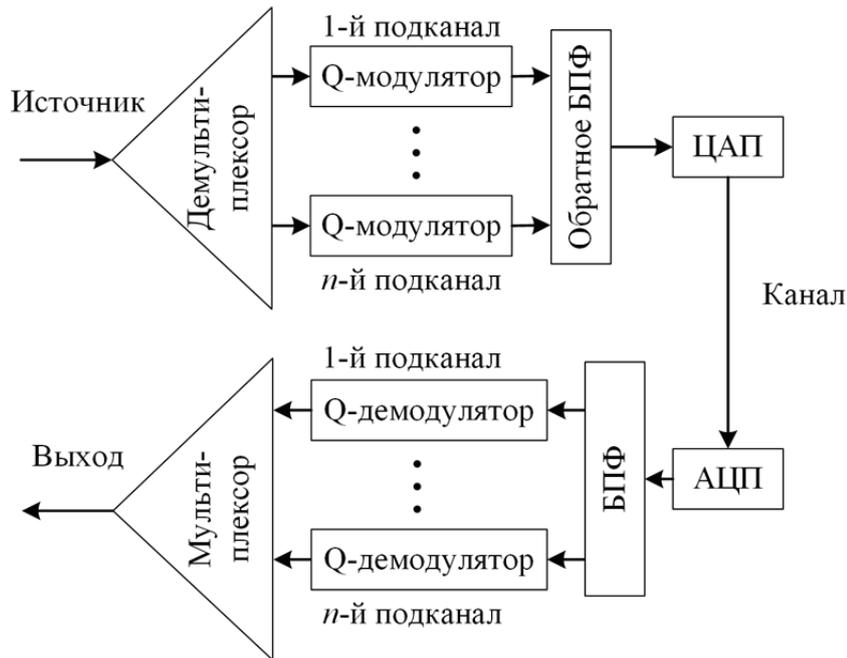


Рис. 53. Модуляция с несколькими несущими

Протокольная единица, передаваемая с помощью одной несущей, называется *символом*. Увеличенная продолжительность символа улучшает устойчивость OFDM, уменьшая максимальный разброс между длительностью символов, передаваемых с помощью разных несущих.

Каждый подканал работает на своей несущей частоте. Если обозначить частоту первой несущей ω , то вторая несущая будет иметь частоту 2ω , и т. д.; для n -го канала эта частота будет равна $n\omega$.

Если для каждого из n подпотоков применить квадратурную модуляцию, то получим n квадратурных (ортогональных) функций типа $a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t$.

Если функции всех подканалов просуммировать, то получим функцию, сходную с функцией, называемой рядом Фурье:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{N-1} [a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t].$$

Функция, полученная в результате модуляции, отличается от ряда Фурье тем, что она конечна. Для увеличения точности обработки и исключения взаимного влияния каналов реальная функция дополняется «префиксом», содержащим несколько значений ряда Фурье (псевдоканалов). Он устанавливается перед последовательностью квадратурных сигналов. Это увеличивает точность получения функции $x(t)$ и позволяет более четко отделять подканалы друг от друга.

Сумма функций, полученных в результате модуляции, «свертывается» с помощью обратного преобразования Фурье в одну функцию $x(t)$, которая преобразуется в цифровую форму и передается в линию.

На приемном конце происходит преобразование из цифровой формы в аналоговую, выполняется прямое преобразование Фурье, квадратурные функции каждого канала демодулируются и собираются в одну последовательность. Для устранения межсимвольной интерференции вводится циклический префикс (CP). Он добавляется в начало каждого OFDM-символа и представляет собой циклическое повторение окончания символа. Наличие циклического префикса создает временные паузы между отдельными символами, и, если длительность «охранного» интервала превышает максимальное время задержки сигнала в результате многолучевого распространения, межсимвольной интерференции не возникает.

Циклический префикс является избыточной информацией и в этом смысле снижает полезную (информационную) скорость передачи, но именно он служит защитой от возникновения межсимвольной интерференции. Указанная избыточная информация добавляется к передаваемому символу в передатчике и отбрасывается при приеме символа в приемнике.

4.2.2. Технология передачи данных MIMO

Система со многими антеннами MIMO и OFDMA являются основой для четвертого поколения сотовой связи.

Технологии интеллектуальной (smart) антенны включают в себя сложные алгоритмы управления множеством антенн, функционирующих по векторному или матричному принципу (антенны с переключением, решетчатые антенны и т. п.). OFDMA подходит для поддержания таких технологий.

Для поддержания технологии интеллектуальной антенны применяются следующие процедуры:

– *формирование диаграммы направленности*. Путем формирования диаграммы направленности система использует множество антенн для передачи сигналов, улучшающих охват и емкость системы и уменьшающих вероятность нарушения связи;

– *коды пространство-время*. Используются для того, чтобы обеспечить пространственное разнесение и оптимальный запас на замирания;

– *пространственное мультиплексирование*. Применяется для повышения скоростей и увеличения пропускной способности. При

пространственном мультиплексировании множество потоков передается по множеству антенн. Если приемник также имеет множество антенн и может отделить различные потоки, это позволяет достигнуть высокой пропускной способности по сравнению с одиночной антенной. Использование системы ММО 2×2 с пространственным мультиплексированием увеличивает пиковую скорость передачи данных вдвое, благодаря передаче двух потоков данных. В направлении «вверх» каждый пользователь имеет только одну передающую антенну. Два пользователя могут передавать совместно в одном и том же слоте – как будто два потока пространственно-мультиплексированы от двух антенн того же самого пользователя. Такой способ называется совместным пространственным мультиплексированием «вверх».

Адаптивный переключатель интеллектуальной антенны показан на рис. 54.

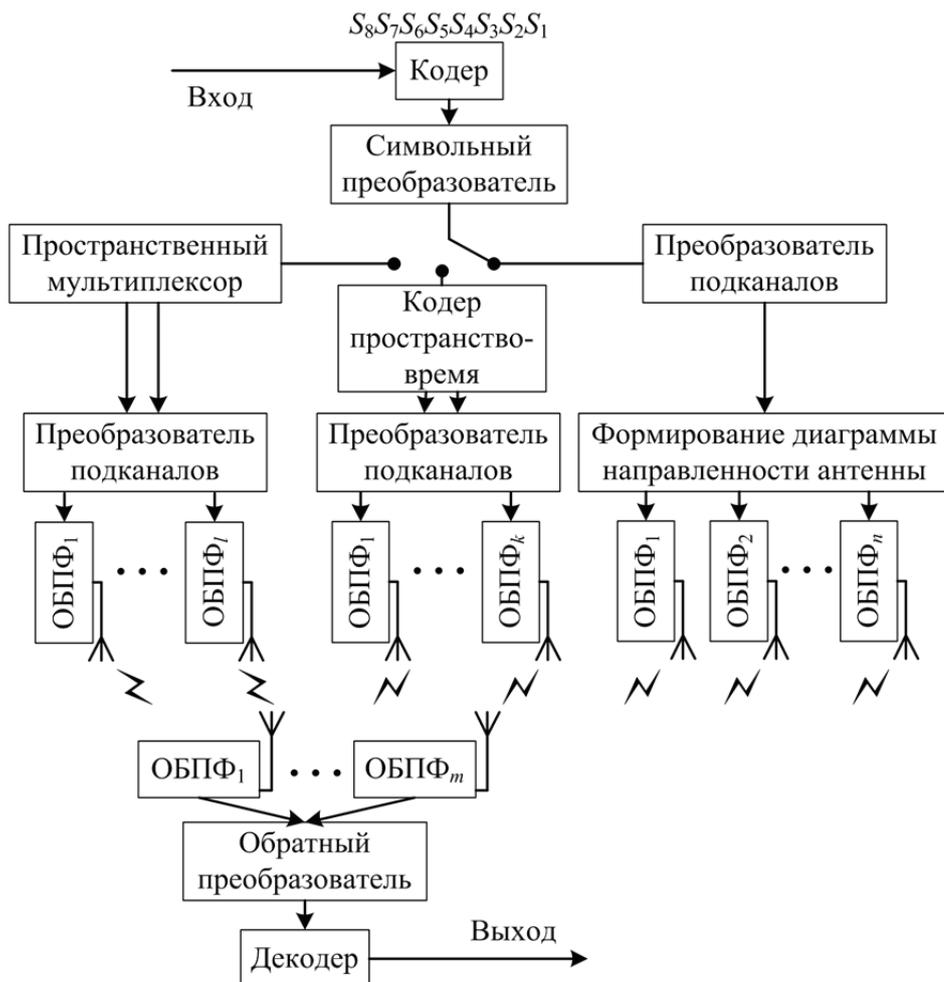


Рис. 54. Адаптивный переключатель интеллектуальной антенны

Последовательность символов, поступающая на кодер, преобразуется символьным преобразователем в пространственную форму либо мультиплексируется для передачи по подканалам. В соответствии с программой, заложенной в адаптивный преобразователь (например, согласно заданной матрице, отражающей пространственное разнесение подканалов), и в зависимости от текущего состояния каналов сигналы передаются по разным подканалам. Они могут также использоваться для преобразования подканалов (например, изменять диаграмму направленности элементов адаптивной антенны), что позволяет изменять параметры среды передачи с целью улучшения качества в соответствии с текущим положением каналов. Они дают возможность также формировать отдельные пучки сигнала для каждого абонента с точностью в несколько десятков метров. Благодаря этому реализован так называемый пространственный метод множественного доступа абонентов SDMA (Space Division Multiple Access), что позволяет значительно снизить общий уровень интерференции в радиоэфире и существенно расширить емкость сети.

Далее полученные сигналы распространяются по определенному закону (последовательно или в соответствии с заданной матрицей) в устройства обратного преобразования Фурье для пространственно-раздельной передачи по радиоинтерфейсу. На приемном конце пространственные сигналы объединяются, и происходит обратное преобразование и декодирование. Пространственное мультиплексирование улучшает пиковую (при наилучших условиях состояния канала) пропускную способность.

Образование каналов проводится по принципу частичного использования поднесущих. При использовании режима с несколькими антеннами 2×2 MIMO в направлении «вниз» пиковая скорость теоретически удваивается. При совместном пространственном мультиплексировании по направлению «вверх» пиковая общая скорость от объединенного устройства (секторная скорость) удваивается, в то время как скорость передачи от каждого пользователя остается неизменной. Применяя различные соотношения скоростей «вниз»/«вверх» по направлениям, можно адаптировать пропускную способность канала.

Для борьбы с замираниями физический уровень OFDMA с помощью адаптивного набора антенн обеспечивает различные варианты разнесения по различным путям следования (второго и чет-

вертого порядка), т. е. организацию нескольких каналов (двух, четырех и т. д.) для передачи и приема одной и той же информации.

Передача информации по нескольким антеннам позволяет увеличить зону покрытия и пропускную способность системы. При этом она сводит к минимуму перерывы в работе системы связи, благодаря формированию диаграммы направленности лучей и нулевому перекрытию передаваемых сигналов.

Варианты разнесения включают набор методов, основанных на разнесении второго и четвертого порядков в направлении «вниз», разнесении второго порядка в направлении «вверх», которые могут гибко варьироваться в зависимости от требуемой емкости и зоны покрытия.

Физический уровень OFDMA обеспечивает варианты алгоритмов управления адаптивной антенной системой: сканирование массива распределения и метод прямой сигнализации.

Сканирование массива распределения поддерживает все методы распределения поднесущих. Метод прямой сигнализации обеспечивает регулировку разделения несущих на поднесущие с помощью сигналов управления, предназначенных для точной настройки антенн БС на МС в данном подканале. В результате, выполнив все необходимые подстройки, БС и МС устанавливают соединение, в течение которого происходит обмен данными.

OFDMA обеспечивает разнесение четвертого порядка по направлению «вниз» и второго порядка (по двум антеннам) по направлению «вверх». В основу разнесения положен принцип пространственно-временного кодирования и код со скачкообразной перестройкой частоты.

Пространственное кодирование основано на алгоритме Аламути. Этот алгоритм предназначен для передачи потоков сигналов по двум антеннам. Потоки передаются попеременно по каждой из антенн. Механизм кода со скачкообразной перестройкой частоты заключается в том, что при переходе к другой антенне поток может быть передан по другому пути со сменой набора поднесущих. При этом используется информация, заложенная в матрицу.

Вопросы для самопроверки

1. На чем базируется технология OFDMA?
2. Что дает увеличение продолжительности символа?
3. Какие преобразования выполняются на приемной стороне по технологии OFDMA?

4. Для чего служит циклический префикс CP?
5. Какие процедуры применяются для поддержания технологии smart-антенны?
6. Как Вы понимаете «совместное пространственное мультиплексирование «вверх»»?
7. Что такое метод множественного доступа SDMA?
8. Что применяют для борьбы с замираниями в технологии MIMO?
9. Что дает разнесение передачи по нескольким антеннам?

4.3. Структура сети стандарта WiMax

Сеть WiMax (рис. 55) состоит из двух основных подсистем: сети доступа ASN (Access Service Network) и сети обеспечения услуг CSN (Connectivity Service Network). Сеть ASN представляет собой набор функций, которые обеспечивают соединение абонентов, а в сеть CSN могут входить такие элементы, как роутеры, БД абонентов, серверы и устройства преобразования сигнала.

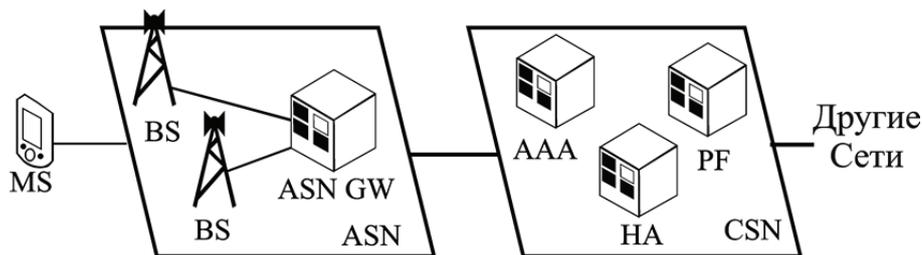


Рис. 55. Структура сети стандарта WiMax

Подсистема CSN определяется как набор функций, предоставляющих абонентам сети функции соединений.

К основным функциям CSN относятся:

- распределение адресов и параметров между пользователями сети;
- доступ к сети интернет;
- контроль доступа абонентов в сеть, основанный на профилях пользователей;
- туннелирование между сетями ASN-CSN;
- биллинг и межоператорское взаимодействие;
- туннелирование между CSN и роуминг;

– мобильность между различными ASN, т. е. хэндовер между различными сетями доступа;

– обеспечение сервисов WiMax, а именно определение местоположения, предоставление соединений типа «точка-точка», резервирование соединений и т. п.

В сеть CSN могут входить такие элементы, как роутеры, AAA сервер, базы данных абонентов, устройства преобразования сигнализации.

AAA (Authentication, Authorization, Accounting) сервер – устройство обеспечения авторизации, аутентификации и аудита пользователей сети. Служит для контроля доступа абонентов в сеть, назначения ключей шифрования, регистрации параметров соединений. Кроме того, хранит профили качества обслуживания абонентов.

PF (Policy Function) – база данных, содержащая сценарии выполнения приложений для различных услуг, предоставляемых сетью WiMax.

НА (Home Agent) – элемент сети, отвечающий за возможность роуминга. Отвечает за обмен данными между сетями разных операторов.

Подсистема ASN – это набор сетевых элементов, предназначенных для организации доступа абонентов WiMax в сеть.

ASN выполняет следующие основные функции:

– доступ абонентов в сеть по радиосоединению;
– передача AAA-сообщений между CSN и абонентским оборудованием для обеспечения функций аутентификации, авторизации и аудита соединений;

– установление сигнальных соединений между и абонентским оборудованием;

– управление радиоресурсами;

– пейджинг, т. е. поиск абонентов в сети при поступлении входящего соединения;

– мобильность абонентов (управление хэндоверами);

– туннелирование между сетями ASN-CSN.

В состав сети ASN входят два основных элемента:

1. BS – базовая станция. Основной ее задачей является установление, поддержание и разъединение радиосоединений. Кроме того, она выполняет обработку сигнализации, распределение ресурсов среди абонентов. В отличие от сетей LTE, UMTS и GSM

базовая станция сети WiMax берет на себя большую часть функций сети абонентского доступа.

2. ASN Gateway – предназначен для объединения трафика и сообщений сигнализации от BS и дальнейшей их передачи в сеть CSN. В одной ASN может быть несколько ASN Gateway. Причем к разным ASN Gateway могут быть подключены одни и те же BS для распределения нагрузки. ASN Gateway – это, по-сути, агрегатор нагрузки сети доступа.

Также неотъемлемым элементом сети WiMax является абонентское оборудование. В качестве такового могут выступать мобильный телефон, ноутбук, стационарный компьютер с встроенным или внешним адаптером и др.

Таким образом, сеть WiMax является полноценным представителем сетей сотовой связи, предоставляющим большие возможности, высокое качество и безопасность соединений. Это дает возможность предсказывать дальнейшее развитие этого стандарта и широкое распространение на практике.

Вопросы для самопроверки

1. Из каких подсистем состоит сеть WiMax?
2. Какие основные функции подсети CSN?
3. Из каких элементов состоит сеть CSN?
4. Какие функции выполняет сеть ASN?
5. Из каких элементов состоит сеть ASN?
6. Для чего предназначен сетевой шлюз ASN Gateway?
7. Что такое AAA-сервер?

4.4. Организация сетей LTE

4.4.1. Архитектура сети стандарта LTE

LTE базируется на трех основных технологиях: мультиплексирование посредством ортогональных несущих OFDM, многоантенные системы MIMO и эволюционная системная архитектура сети (System Architecture Evolution).

При разработке архитектуры сети LTE были приняты во внимание следующие общие принципы:

- 1) логически разделены транспортные подсети передачи пользовательских данных и служебной информации;
- 2) сеть радиодоступа и базовая пакетная сеть полностью освобождены от транспортных функций. Схемы адресации, использу-

емые в этих сетях, не должны быть связаны со схемами адресации, используемыми при реализации транспортных функций;

3) управление мобильностью абонентов и/или пользовательских терминалов полностью возложено на сеть радиодоступа;

4) функциональное разделение интерфейсов сети радиодоступа должно иметь несколько возможных опций;

5) интерфейсы должны базироваться на логической модели блока, управляемого данным интерфейсом;

6) один физический элемент сети может содержать в себе несколько логических блоков.

Из схемы сети LTE (рис. 56) видно, что структура сети сильно отличается от сетей стандартов 2G и 3G. Существенные изменения претерпела и подсистема базовых станций, и подсистема коммутации. Была изменена технология передачи данных между оборудованием пользователя и БС. Также подверглись изменению и протоколы передачи данных между сетевыми элементами. Вся информация (голос, данные) передается в виде пакетов. Таким образом, уже нет разделения на части, обрабатывающие либо только голосовую информацию, либо только пакетные данные.

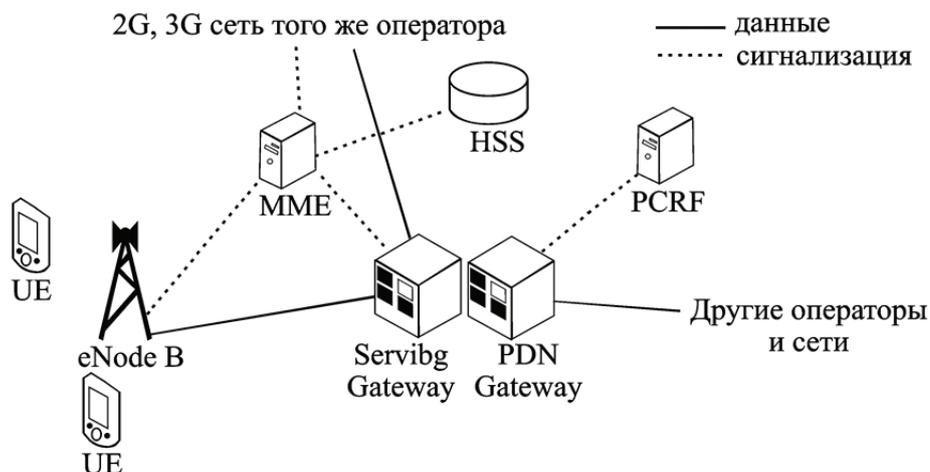


Рис. 56. Структура сети стандарта LTE

Можно выделить следующие основные элементы сети стандарта LTE:

– *обслуживающий шлюз сети LTE Serving Gateway (SGW)*. Он предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных, поступающих из/в подсистему базовых станций. По своей сути этот шлюз заменяет MSC, MGW и SGSN сети UMTS. SGW имеет

прямое соединение с сетями второго и третьего поколений того же оператора, что упрощает передачу соединения в/из них по причинам ухудшения зоны покрытия, перегрузок и т. п;

– шлюз к/от сетей других операторов Public Data Network (PDN) Gateway (PGW). Если информация (голос, данные) передаются из/в сети данного оператора, то они маршрутизируются именно через PGW;

– узел управления мобильностью MME (Mobility Management Entity). Он предназначен для управления мобильностью абонентов сети LTE;

– сервер абонентских данных HSS (Home Subscriber Server). HSS представляет собой объединение VLR, HLR, AUC, выполненных в одном устройстве;

– узел выставления счетов абонентам за оказанные услуги связи PCRF (Policy and Charging Rules Function).

Все перечисленные выше элементы относятся к системе коммутации сети LTE. В системе БС остался лишь один знакомый нам элемент – БС, которая получила название eNodeB (eNB). Этот элемент выполняет функции и БС, и контроллера БС сети LTE. За счет этого упрощается расширение сети, т. к. не требуется расширение емкости контроллеров или добавления новых.

Сеть LTE состоит из двух важнейших компонентов: сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE (англ. System Architecture Evolution). Их взаимодействие показано на рис. 57.

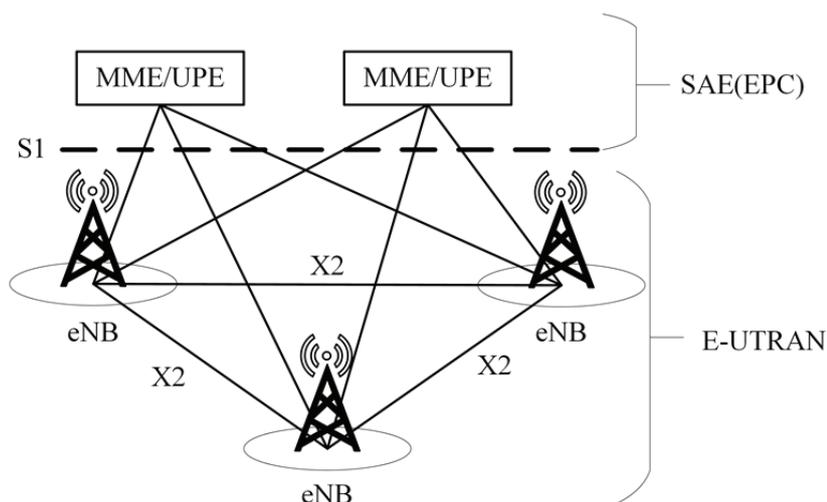


Рис. 57. Взаимодействие сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE

Сеть радиодоступа E-UTRAN рассмотрена в ряде технических спецификаций, согласно которым она состоит только из БС. Базовые станции eNB являются элементами полносвязной сети E-UTRAN и соединены между собой по принципу «каждый с каждым» при помощи интерфейса X2. Интерфейс X2 поддерживает хэндовер мобильного терминала в активном состоянии. Каждая eNB имеет интерфейс S1-C с базовой сетью SAE, построенной по принципу коммутации пакетов.

Базовая сеть SAE, иногда называемая сетью EPC (Evolved Packet Core), содержит SGW, PDNG, PCRF, HSS, узлы MME/UE, состоящие из логических элементов MME и UE. EPC служит эквивалентом сети GPRS. Логический элемент MME взаимодействует с БС сети E-UTRAN с помощью протоколов плоскости управления C-plane (интерфейс S1-C). Логический элемент UE (User Plane Entity) отвечает за передачу данных пользователей согласно протоколам плоскости пользователя U-plane и взаимодействует с eNB посредством интерфейса S1-U.

Благодаря интерфейсу S1 базовые станции соединены с несколькими узлами MME/UE, что позволяет более гибко использовать сетевой ресурс.

4.4.2. Канальная структура сетей LTE

Есть три категории, в которые могут быть сгруппированы различные каналы передачи данных:

- логические каналы – предоставляют услуги среднего уровня управления доступом MAC в пределах структуры протокола LTE. Логические каналы по типу передаваемой информации делятся на логические каналы управления и логические каналы трафика;

- транспортные каналы – транспортные каналы физического уровня предлагают передачу информации в MAC и выше. Информационные сообщения на транспортном уровне разбивают на транспортные блоки. В каждом временном интервале передачи по радиointерфейсу передают хотя бы один транспортный блок. При использовании технологии MIMO возможна передача до четырех блоков в одном транспортном канале;

- физические каналы – это каналы передачи, которые переносят пользовательские данные и управляющие сообщения. Они изменяются между восходящим и нисходящим потоками.

В сетях LTE (также, как и в сетях UMTS) вводится понятие сквозного канала (end-to-end bearer) между двумя оконечными точками: либо между двумя пользователями, либо, например, между пользовательским терминалом и каким-либо интернет-сервером.

На рис. 58 показано отображение физических, транспортных и логических каналов в нисходящем направлении.

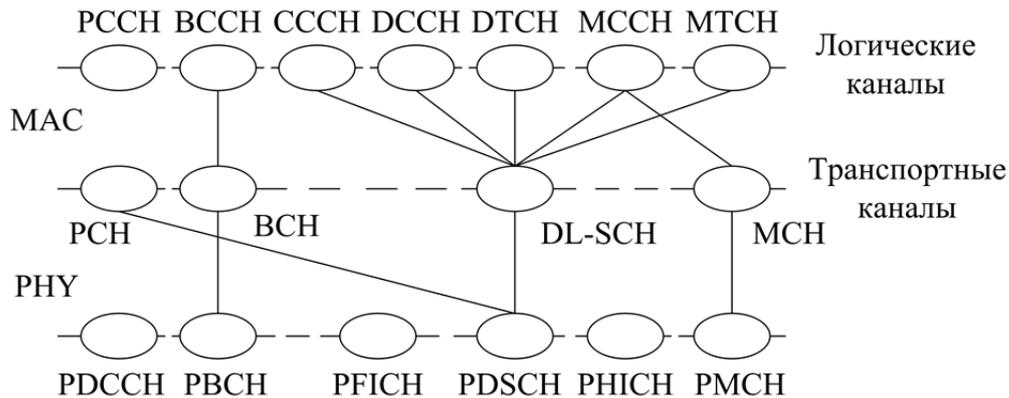


Рис. 58. Отображение каналов в нисходящем направлении

Взаимное отображение логических, транспортных и физических каналов в восходящем направлении показано на рис. 59.

Имеет место понятие канала, переносящего ряд параметров качества обслуживания, устанавливаемого между MS и шлюзом пакетной сети. В LTE-спецификациях такой канал называется EPS-канал (EPS bearer, выделенная пакетная система).

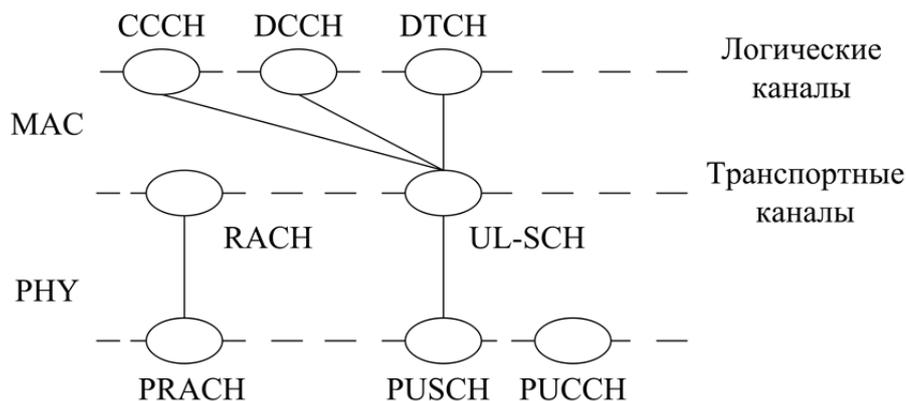


Рис. 59. Отображение каналов в восходящем направлении

Каждый IP-поток, например, голосовой трафик, передаваемый посредством IP-протокола (VoIP), связан с индивидуальным

EPS-каналом, и, в соответствии с этим, сеть способна устанавливать различным абонентам разные приоритеты. Когда IP-пакет приходит извне (внешняя IP-сеть, Интернет), он классифицируется обслуживающим узлом по качеству обслуживания на основе предустановленных параметров, отображается в соответствующий EPS-канал и далее передается по радиоканалу между eNB и MS. Таким образом, существует взаимно-однозначное соответствие между EPS-каналом и радиоканалом.

4.4.3. Радиointерфейс LTE

В LTE дуплексное разделение каналов может быть как частотным (FDD), так и временным (TDD). Это позволяет операторам очень гибко использовать частотный ресурс. Поддержка FDD очень удобна для традиционных сотовых операторов, поскольку у них спаренные частоты есть «по определению» – так организованы практически все существующие системы сотовой связи. FDD более эффективен в плане использования частотного ресурса, чем TDD, за счет меньших накладных расходов (служебных полей, интервалов и т. п.).

По сравнению с ранее разработанными системами 3G радиointерфейс LTE обеспечивает улучшенные технические характеристики, включая максимальную скорость передачи данных более 300 Мбит/с, время задержки пересылки пакетов менее 10 мс, а также значительно более высокую спектральную эффективность.

Функционирование сетей LTE может осуществляться в частотных диапазонах с различной шириной. Сигналы нисходящего и восходящего направлений могут занимать полосы от 1,4 до 20 МГц в зависимости от количества активных ресурсных блоков. Передача информации в восходящем и нисходящем направлениях организована в кадрах, длительность которых равна 10 мс. Кадры подразделяются на более мелкие временные структуры – слоты. В режиме с частотным разнесением FDD кадр делится на 20 слотов, нумеруемых от нулевого до 19-го, каждый из которых имеет длительность 0,5 мс.

Особенностью радиointерфейса в линии «вниз» сети E-UTRAN является использование технологии множественного доступа OFDMA. В линии «вниз» сети E-UTRAN применяют следующие виды модуляции: QPSK, 16 QAM, 64QAM.

Для борьбы с межсимвольной интерференцией используются циклические префиксы ЦП (CP). Применяют короткие и длинные префиксы, длительность которых 4,7 мкс и 16,7 мкс соответственно.

В линии «вверх» радиоинтерфейса сети LTE E-UTRAN используется технология SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) – множественный доступ с мультиплексированием с частотным разнесением передачи на одной несущей.

Распределение частотного ресурса между абонентами осуществляется ресурсными блоками, каждому из которых соответствует полоса частот 180 кГц, что при разносе между соседними поднесущими частотами в 15 кГц соответствует 12 поднесущим. Максимальное количество доступных ресурсных блоков зависит от выделения системе диапазона частот, значение которого может доходить до 20 МГц.

При расстоянии между поднесущими $\Delta F = 15$ кГц (опционально возможен еще вариант с $\Delta F = 7,5$ кГц) длительность OFDM символа составляет $1 / \Delta F = 66,7$ мкс. В каждом слоте (0,5мс) передают 6 или 7 OFDM символов в зависимости от длительности циклического префикса (CP). Длительность циклического префикса равна $T_{CP} = 5,2$ мкс перед первым символом и $T_{CP} = 4,7$ мкс перед остальными символами. Также есть возможность использования расширенного циклического префикса длительностью $T_{CP} = 16,7$ мкс. В этом случае в одном слоте передаются 6 OFDM символов.

Каждому абонентскому устройству в каждом слоте назначается определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области – ресурсная сетка (рис. 60).

Ячейка ресурсной сетки, так называемый ресурсный элемент, соответствует одной поднесущей в частотной области и одному OFDM-символу – во временной. Ресурсные элементы образуют ресурсный блок – минимальную информационную единицу в канале. Ресурсный блок занимает 12 поднесущих (180 кГц) и 7 или 6 OFDM-символов, в зависимости от типа циклического префикса – так, чтобы общая длительность слота составляла 0,5 мс. Число ресурсных блоков NRВ в ресурсной сетке зависит от ширины полосы канала и составляет от 6 до 110. Ресурсный блок – это минимальный ресурсный элемент, выделяемый абонентскому устройству планировщиком базовой станции. О распределении ресурсов в каждом слоте базовая станция сообщает в специальном управляющем канале.

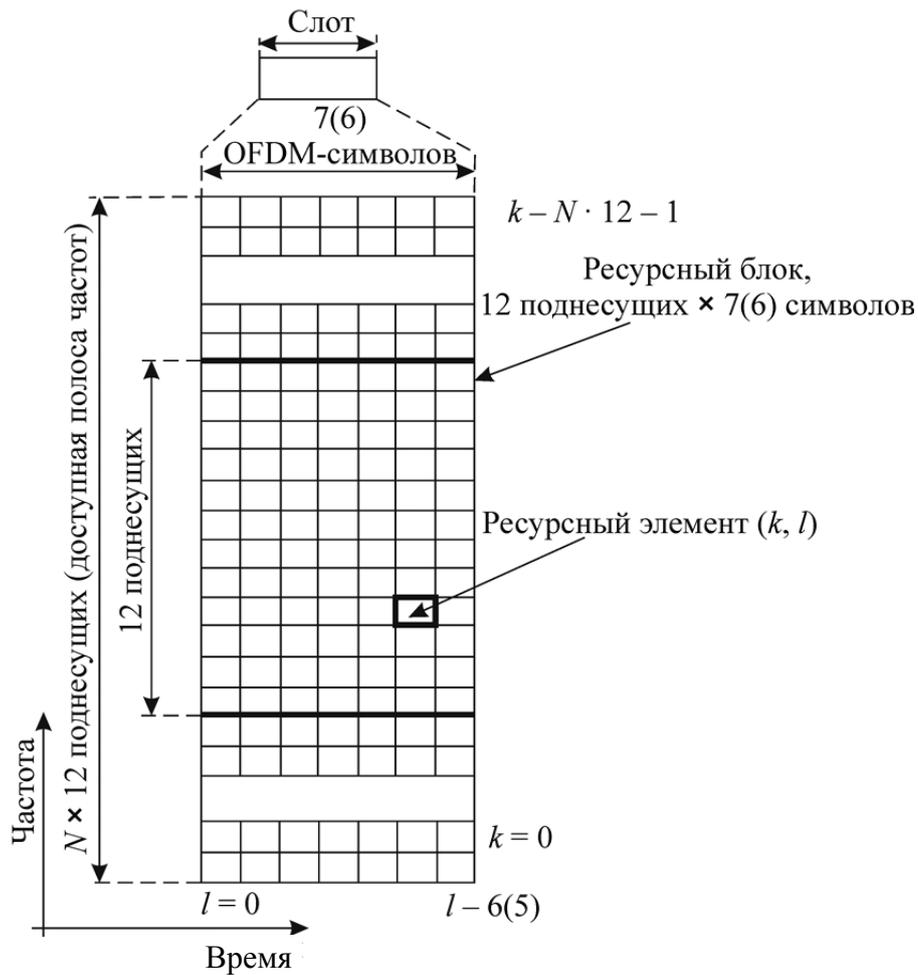


Рис. 60. Ресурсная сетка LTE

В радиointерфейсе LTE реализована функция диспетчеризации в зависимости от состояния канала связи. Она обеспечивает передачу данных на повышенных скоростях (за счет использования модуляции более высокого порядка, уменьшения степени кодировки каналов, передачи дополнительных потоков данных и меньшего числа повторных передач), используя для этого временные и частотные ресурсы с относительно хорошими условиями связи. Таким образом, для передачи любого конкретного объема информации требуется меньше времени. Частотно-временная сетка OFDM помогает выбирать ресурсы в частотной и временной областях.

Для трафика сервисов, пересылающих пакеты с небольшой полезной нагрузкой и через одинаковые промежутки времени, объем трафика сигнализации, необходимой для динамической диспетчеризации, может превышать объем переданной пользователем ин-

формации. Поэтому в LTE также имеется функция статической диспетчеризации (в дополнение к динамической). Под статической диспетчеризацией понимается выделение пользователю радиочастотного ресурса для передачи определенного числа подкадров.

Спецификации LTE определяют несколько фиксированных значений для ширины восходящего и нисходящего каналов между eNB и MS (табл. 6).

Таблица 6

Параметры канала передачи

Ширина канала, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100
Число поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Число номинальных несущих для БПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Тактовая частота для БПФ, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Поскольку в OFDM используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), число формальных поднесущих для упрощения процедур цифровой обработки сигнала должно быть кратно $N = 2n$ (т. е. 128, 256, ..., 2048). При этом частота выборок должна составлять $F_s = \Delta f \cdot N$. При заданных в стандарте значениях она оказывается кратной 3,84 МГц – стандартной частоте выборок в технологии WCDMA. Это очень удобно для создания устройств, поддерживающих как WCDMA, так и LTE. Разумеется, при формировании сигнала амплитуды «лишних» поднесущих (включая центральную поднесущую канала) считаются равными нулю.

4.4.3.1. Использование технологии MIMO в LTE.

Технология MIMO в сетях LTE играет одну из важных ролей в обеспечении высоких скоростей передачи данных. С применением технологии MIMO становится возможным увеличить помехоустойчивость каналов связи, уменьшить относительное число битов, принятых с ошибкой.

Использование многоантенной передачи информации в системах мобильной связи улучшает технические характеристики последних и расширяет их возможности в плане обслуживания абонентов.

В технологии LTE предусмотрены два метода многоантенной передачи: разнесенная (transmit diversity) и многопоточная (с предварительным кодированием), частным случаем которой является формирование узкого радиолуча.

Разнесенную передачу следует рассматривать как способ выравнивания уровня сигнала, идущего с двух антенн. При этом устраняются глубокие провалы в уровне сигналов, принимаемых от каждой из антенн в отдельности.

В LTE разнесенная передача основана на методе пространственно-частотного блочного кодирования (SFBC), дополненного разнесением по времени со сдвигом частоты (FSTD) при использовании четырех антенн. Разнесенная передача применяется в основном на общих нисходящих каналах, в которых нельзя использовать функцию диспетчеризации в зависимости от состояния канала связи (channel-dependent scheduling). Однако разнесенную передачу можно задействовать для пересылки пользовательских данных, например, трафика VoIP. Разнесенная передача повышает емкость сети и радиус сот.

При многопоточной передаче для одновременной пересылки нескольких потоков данных по одному и тому же радиоканалу используют несколько передающих и приемных антенн (на базовой станции сети и в терминальном устройстве соответственно). Это значительно повышает максимальную скорость передачи данных. Работа таких систем может быть организована по двум принципам: по принципу пространственного уплотнения и по принципу пространственно-временного кодирования. Суть первого принципа заключается в том, что различные передающие антенны будут передавать различные части блока информационных символов или различные информационные блоки. Передача данных ведется параллельно с двух или с четырех антенн. На приемной стороне производится прием и разделение сигналов различных антенн, и становится возможным увеличение максимальной скорости передачи данных в 2 или в 4 раза.

Например, при установке четырех антенн на базовой станции и такого же числа антенн в терминальном устройстве (на приемной стороне) можно одновременно пересылать до четырех потоков данных по одному и тому же радиоканалу, фактически увеличивая его пропускную способность в четыре раза.

В сетях с небольшой рабочей нагрузкой или маленькими сотами многопоточная передача позволяет добиваться очень высокой пропускной способности радиоканалов и эффективнее использовать радиоресурсы. В случае же с большими сотами и весьма интенсивной нагрузкой качество канала не дает возможности использовать мно-

гопоточную передачу. Тогда с целью повышения качества сигнала несколько передающих антенн целесообразнее задействовать для формирования узкого луча при передаче одного потока данных.

4.4.3.2. Повторная передача данных в LTE. В любой системе связи время от времени возникают ошибки при пересылке данных, например, из-за шумов, помех и замирания сигнала. Применяются методы повторной передачи искаженных или утраченных частей данных. Чем эффективнее организован протокол повторной передачи, тем рациональнее используются радиоресурсы.

Для максимально полного использования высокоскоростного радиointерфейса в технологии LTE реализована динамическая эффективная двухуровневая система повторной передачи, реализующая протокол HARQ, с небольшими накладными расходами на обратную связь и повторную посылку данных, который дополнен высоконадежным протоколом селективного повтора ARQ.

Протокол HARQ предоставляет приемному устройству избыточную информацию, дающую ему возможность исправлять определенную часть ошибок. Повторные передачи по протоколу HARQ создают дополнительную информационную избыточность, нужную в том случае, если для устранения ошибок первой передачи оказалось недостаточно. Повторная передача пакетов, не исправленных протоколом HARQ, осуществляется посредством протокола ARQ.

Данное решение обеспечивает малую задержку передачи пакетов с небольшими накладными расходами, при этом надежность связи гарантируется. Большинство ошибок обнаруживаются и исправляются с помощью протокола HARQ. Поэтому повторная передача данных по протоколу ARQ происходит лишь изредка.

В технологии LTE окончательным узлом, поддерживающим протоколы HARQ и ARQ, является базовая станция, обеспечивающая тесную связь уровней протоколов HARQ и ARQ. К разнообразным преимуществам такой архитектуры относятся быстрое устранение ошибок, оставшихся после работы HARQ, и регулируемый объем данных, передаваемых с использованием протокола ARQ.

4.4.4. Технология передачи голоса по сети LTE

Технология передачи голоса по сети LTE VoLTE основана на IP мультимедийной подсистеме (IMS) и позволяет предоставлять голосовые услуги и доставлять их как поток данных по LTE. VoLTE имеет в три раза больше голосовую емкость и емкость

данных, чем сети 3G UMTS и до шести раз больше, чем сети 2G GSM. Кроме того, она высвобождает пропускную способность, поскольку заголовки пакетов меньше.

IMS – спецификация передачи мультимедийного содержимого в электросвязи на основе протокола IP. Изначально разрабатывалась только как мультимедийная платформа предоставления услуг. Позднее превратилась в архитектуру, полностью контролирующую соединение и работающую с различными сетями доступа.

Так как голос является очень чувствительным к характеристикам передачи, то необходимо иметь в сети поддержку качества обслуживания QoS. Стандартом LTE определяется набор идентификаторов QCI, которые задают параметры передачи для каждого соединения. Для организации VoLTE нужна поддержка двух QCI: 1 и 5. QCI 1 используется для передачи голоса, а QCI 5 – для передачи сигнальных IMS сообщений.

По соединению с QCI 5 передаются управляющие IMS сообщения для создания и удаления соединения для передачи голосовых данных. При этом используется протокол SIP (Session Initiation Protocol). Соединение для передачи контрольных сообщений является non-GBR (Guaranteed Bit Rate) с высоким приоритетом (приоритет 1). Кроме этого, данное соединение имеет высокие требования к надежности передачи (10^{-6}), которые достигаются использованием режима передачи с подтверждениями на уровне RLC (так называемый Acknowledge Mode, AM RLC). Для этого соединения не применяется механизм сжатия заголовков RHC (Robust Header Compression).

Через соединение с QCI 1 передаются голосовые данные с использованием стека протоколов RTP/UDP/IP. Данное соединение имеет приоритет 2 (влияет на время ожидания в очередях) и требования к гарантированной скорости передачи (так называемое Guaranteed Bit Rate соединение). В качестве требования к задержке передачи данных указано значение 100 мс – достаточно низкая величина, при которой организуется своевременная доставка голоса абоненту. При передаче данных по соединению с QCI 1 используется механизм сжатия заголовков (RHC) и режим передачи данных без подтверждений на уровне RLC (Unacknowledged Mode, UM).

Для работы VoIP необходима поддержка и со стороны UE. UE в RRC сообщении “UE Capability Information” передает следующую информацию:

– профайлы ROHC (поддерживается ли ROHC для RTP/UDP/IP и UDP/IP стеков);

– в поле 'Feature Group Indicators' (FGI) указываются следующие биты: третий бит должен быть выставлен, если поддерживается 5 бит для номера пакета в RLC UM и 7 бит для номера пакета PDCP; седьмой бит должен быть выставлен, если поддерживается RLC UM режим.

4.4.5. Стеки протоколов и услуги

На рис. 61 показан относящийся к различным плоскостям стек протоколов, разделенный на следующие уровни:

- физический (PHY);
- управления доступом к среде MAC (Medium Access Control);
- управления радиоканалом RLC (Radio Link Control);
- протокола слияния пакетных данных PDCP (Packet Data Convergence Protocol);
- управления радиоресурсами RRC (Radio Resource Control);
- протокола, функционирующего вне слоя доступа (NAS-протокол).

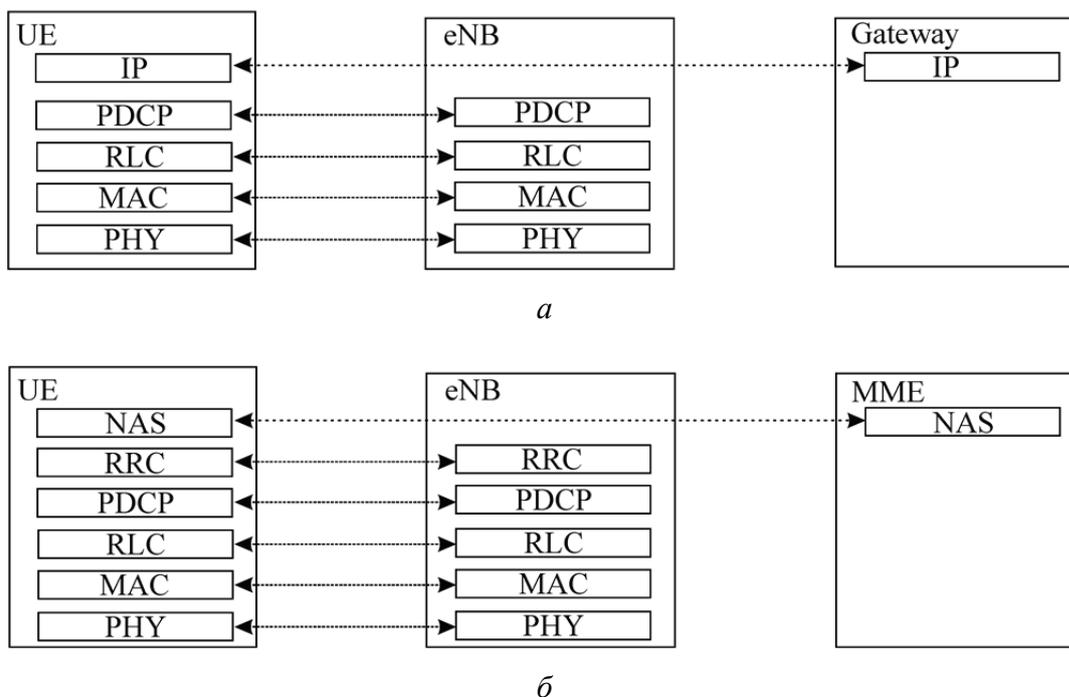


Рис. 61. Стек протоколов в пользовательской плоскости (а) и в плоскости управления (б)

На подуровнях RLC, MAC, RLC и PDCP в пользовательской плоскости выполняются такие же функции, что и в плоскости управления. Функции подуровня RRC ограничены только плоскостью управления: это вещание системной информации, вызов, управление радиоканалом, соединением на данном подуровне, мобильностью, составление отчетов об измерении параметров UE.

Также в плоскость управления отнесен протокол обмена информацией вне слоя доступа (протокол NAS) и локализованный между MME и UE; он предназначен для решения задач, не связанных с вопросами радиодоступа: управление сквозным каналом передачи данных, аутентификация и защита пользовательских данных и др.

На нижнем, физическом уровне (уровне 1), реализованы услуги по передаче данных на более высокие уровни. Выполнение таких услуг связано с обеспечением следующих функций:

- обнаружение ошибок в транспортном канале и индикация об этом на более высокие уровни;
- помехоустойчивое кодирование и декодирование данных в транспортном канале;
- гибридные запросы на повторную пересылку пакетов данных;
- энергетическое выравнивание физических каналов с помощью весовых множителей;
- модуляция/демодуляция физических каналов;
- частотная и временная синхронизация;
- измерение радиочастотных характеристик и индикация об этом на более высокие уровни;
- разнесенная передача и параллельная антенная обработка (методы MIMO);
- формирование диаграммы направленности;
- радиочастотная обработка сигналов.

Точки доступа к услугам между физическим уровнем и MAC-подуровнем обеспечиваются транспортными каналами, а между MAC-подуровнем и RLC-подуровнем – логическими каналами. Структура канального уровня, называемого также уровнем 2, в нисходящем и восходящем направлениях отличается; в нисходящем направлении на MAC-подуровне происходит управление приоритетом нескольких UE, в то время как в восходящем направлении такое управление относится только к одному UE.

В технологии LTE предусмотрен ряд функций, обеспечивающих эффективное использование быстро меняющихся условий радиосвязи. Функция диспетчеризации в зависимости от состояния канала выделяет пользователям лучшие ресурсы. Многоантенные технологии уменьшают замирание сигнала, а механизмы адаптации канала задействуют такие методы модуляции и кодирования сигнала, которые гарантируют наилучшее качество связи в конкретных условиях. В восходящем канале связи механизм регулирования мощности позволяет достичь высокого качества сигнала и бороться с взаимными помехами. Активное применение перечисленных выше функций стало возможным благодаря сочетанию механизмов быстрой повторной передачи данных и комбинирования переданных данных с инкрементальной избыточностью.

4.4.6. Помехоустойчивое кодирование

Рассмотрим процедуры помехоустойчивого кодирования, которые являются общими для восходящего и нисходящего направлений. Спецификация TS 36.212 предполагает два способа помехоустойчивого кодирования, используемых при формировании сигналов. Основным способом помехоустойчивого кодирования является турбокодирование со скоростью 1/3. Рассмотрим схемы сверточного кодера со скоростью кодирования 1/3, которые применяются при формировании сигнала широковещательного канала ВСН. В качестве кодера турбокода используется схема двух параллельно связанных сверточных кодеров с внутренним перемежителем (рис. 62).

В начале кодирования в ячейки вспомогательных кодеров должны быть записаны нули. В процессе кодирования биты турбокода снимаются с выходов кодера в следующем порядке:

$$\begin{aligned}d_k^{(0)} &= x_k, \\d_k^{(1)} &= z_k, \\d_k^{(2)} &= z'_k, \quad k=0,1,2,\dots,K-1,\end{aligned}$$

где x_1, x_2, \dots, x_k – биты, поступающие на вход кодера турбокода; z_1, z_2, \dots, z_k – биты с выхода первого вспомогательного кодера; z'_1, z'_2, \dots, z'_k – биты с выхода второго вспомогательного кодера. Биты x_1, x_2, \dots, x_k будем называть систематическими, а биты, полученные с выходов вспомогательных кодеров, – проверочными.

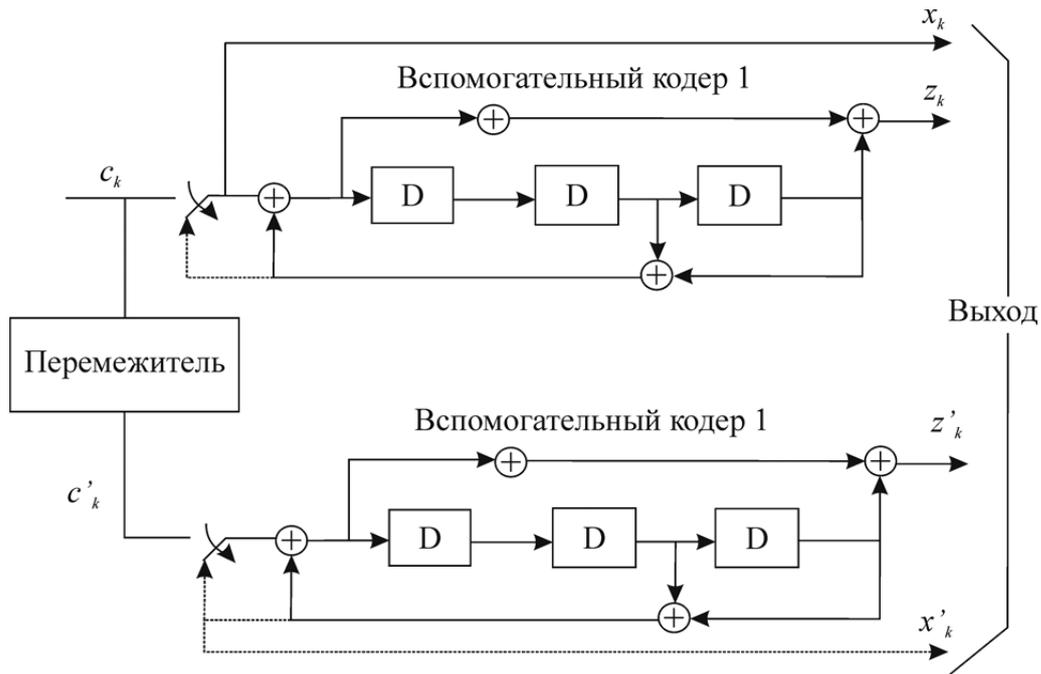


Рис. 62. Схема кодера турбокода

После того, как на вход турбокодера поступает последний информационный бит, т. е. бит с номером K , к кодированному блоку добавляются окончательные биты. При этом сначала верхний переключатель турбокодера переводится в нижнее положение и, при тактировании только первого вспомогательного кодера, снимаются первые три окончательных бита. Далее нижний переключатель турбокодера переводится в нижнее положение и, при тактировании только второго вспомогательного кодера, снимаются остальные три окончательных бита:

$$\begin{aligned} d_K^{(0)} &= x_K, & d_{K+1}^{(0)} &= z_{K+1}, & d_{K+2}^{(0)} &= x'_K, & d_{K+3}^{(0)} &= z'_{K+1}; \\ d_K^{(1)} &= z_K, & d_{K+1}^{(1)} &= x_{K+2}, & d_{K+2}^{(1)} &= z'_K, & d_{K+3}^{(1)} &= x'_{K+2}; \\ d_K^{(2)} &= x_{K+1}, & d_{K+1}^{(2)} &= z_{K+2}, & d_{K+2}^{(2)} &= x'_{K+1}, & d_{K+3}^{(2)} &= z'_{K+2}. \end{aligned}$$

Переключатель кодера турбокода осуществляет перестановку бит в следующем порядке. Если на его вход поступает последовательность бит c_0, c_1, \dots, c_{k-1} , то на выходе переключателя будет сформирована последовательность

$$c'_i = c_{\Pi(i)}, \quad i = 0, 1, \dots, K-1.$$

Последовательность номеров $\Pi(i)$, в соответствии с которой изменяется порядок следования бит, формируется по формуле

$$\Pi(i) = (f_1 i + f_2 i) \bmod K.$$

Параметры f_1, f_2 зависят от размера битовой последовательности K и определяются таблицей, приведенной в спецификации TS 36.212.

Структурная схема сверточного кодера показана на рис. 63.

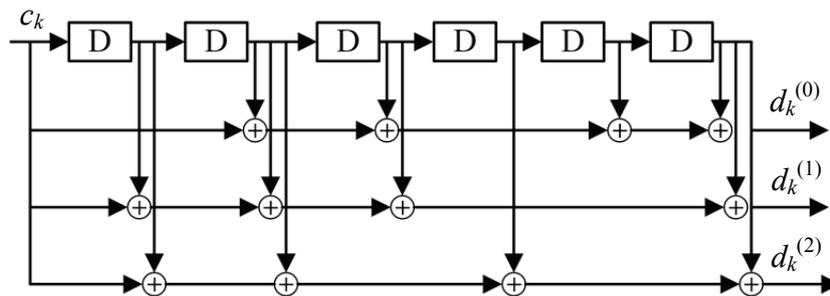


Рис. 63. Сверточный кодер со скоростью кодирования 1/3

Перед началом процедуры кодирования в ячейки регистра сдвига должны быть записаны последние 6 бит информационной последовательности c_i . Результат кодирования считывается последовательно с трех выходов кодера $d_0^{(0)}, d_0^{(1)}, d_0^{(2)}, d_1^{(0)}, d_1^{(1)}, d_1^{(2)}$, и т. д.

Вопросы для самопроверки

1. На каких трех основных технологиях базируется LTE?
2. Назовите основные элементы сети стандарта LTE.
3. Назовите шлюзы сети LTE. Для чего они предназначены?
4. На какие компоненты подразделяется вся сеть LTE?
5. Каким образом устанавливается приоритет абонента при получении IP-пакетов?
6. Чему равна ширина полосы для передачи сигналов в LTE?
7. Какие виды модуляции применяются в сети E-UTRAN?
8. Для чего применяются циклические префиксы CP?
9. Чему равна длительность OFDM символа при $\Delta F = 15$ кГц?
10. Как устроена ресурсная сетка?
11. В чем суть разнесенной передачи в MIMO?
12. Как организуется многопоточная передача?
13. Что регламентирует протокол HARQ?
14. На какие уровни разделен стек протоколов в LTE?
15. Какие способы кодирования применяются в LTE?
16. В каком порядке перемежитель кодера турбокода осуществляет перестановку бит?

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков, В. Ю. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование: учеб. пособие для вузов / В. Ю. Бабков, М. А. Вознюк, П. А. Михайлов. – 3-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 222 с.
2. Технологии мобильной связи: услуги и сервисы / А. Г. Бельтов [и др.]. – М.: Инфра-М, 2015. – 206 с.
3. Берлин, А. Н. Цифровые сотовые системы связи / А. Н. Берлин. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
4. Веселовский, К. Системы подвижной радиосвязи / К. Веселовский; под ред. А. И. Ледовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 536 с.
5. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учеб. пособие для вузов / Л. Н. Волков, М. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
6. Галкин, В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособие для вузов / В. А. Галкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 432 с.
7. Гельгор, А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А. Л., Попов Е. А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.
8. Громаков, Ю. Я. Стандарты и системы подвижной радиосвязи / Ю. А. Громаков. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 237 с.
9. Системы мобильной связи: учеб. пособие для вузов / В. П. Ипатов [и др.]; под ред. В. П. Ипатова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 272 с.
10. Карташевский, В. Г. Сети подвижной связи / В. Г. Карташевский, С. Н. Семенов, Т. В. Фирстова. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 299 с.
11. Лохвицкий, М. С. Сотовая связь: от поколения к поколению / М. С. Лохвицкий, Н. С. Мардер. – М.: ИКАР, 2014. – 236 с.
12. Маковеева, М. М. Системы связи с подвижными объектами: учеб. пособие для вузов / М. М. Маковеева, Ю. С. Шинаков. – М.: Радио и связь, 2002. – 440 с.
13. Прокис, Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; пер. с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
14. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ОСНОВЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ.....	5
1.1. Основные виды мобильной связи.....	5
1.2. История развития и поколения сотовой связи	8
1.3. Методы множественного доступа	14
1.4. Сигнал и его основные характеристики	18
1.4.1. Виды сигналов, применяемые в телекоммуникации	18
1.4.2. Основные характеристики сигнала.....	19
1.4.3. Виды модуляции цифровых сигналов	20
1.5. Проблемы передачи сигнала.....	25
1.5.1. Затухание сигнала.....	25
1.5.2. Теневые зоны.....	26
1.5.3. Многолучевое распространение сигналов	26
1.5.4. Замирания сигнала.....	27
1.5.5. Временные задержки.....	28
1.6. Способы противодействия отрицательным воздействиям на радиосигнал	30
1.6.1. Перемежение	31
1.6.2. Разнесенный прием.....	32
1.6.3. Перескоки по частоте	33
1.6.4. Адаптивная коррекция	34
1.6.5. Помехоустойчивое кодирование.....	35
1.6.6. Управление мощностью.....	36
1.7. Организация сотовых сетей	38
1.7.1. Элементы сотовых сетей связи	38
1.7.2. Планирование сотовых сетей	39
1.7.3. Организация связи в сотовых сетях.....	45
РАЗДЕЛ 2. СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ ПОКОЛЕНИЯ 2G.....	47
2.1. Общие характеристики стандарта GSM	47
2.2. Планирование сетей GSM	50
2.2.1. Сотовая структура.....	50
2.2.2. Выбор геометрических параметров ячейки	54
2.3. Элементы сети GSM	56

2.3.1. Мобильная станция.....	56
2.3.2. Базовая станция.....	58
2.3.3. Центр коммутации.....	60
2.3.4. Интерфейсы.....	63
2.4. Физические и логические каналы в GSM.....	65
2.5. Процедуры обработки радиосигналов.....	67
2.5.1. Обработка сигналов в стандарте GSM.....	67
2.5.2. Канальное кодирование.....	69
2.5.3. Шифрование.....	70
2.5.4. Передача кадров.....	71
2.5.5. Перемежение блоков.....	73
2.5.6. Форматирование пакетов.....	74
2.5.7. Кадры TDMA.....	75
2.5.8. Перескоки частоты.....	77
2.5.9. Адаптивная эквалаизация.....	78
2.5.10. Временное опережение передачи.....	79
2.5.11. Аутентификация.....	79
2.6. Сотовые системы стандарта CDMA.....	81
2.6.1. Технология CDMA.....	82
2.6.2. Структура сети CDMA.....	86
2.6.3 Организация каналов в стандарте CDMA.....	86

РАЗДЕЛ 3. СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

ПОКОЛЕНИЯ 3G.....	101
3.1. Технологии поколения 2,5G+.....	101
3.1.1. Технология HSCSD.....	101
3.1.2. Технология GPRS.....	102
3.1.3. Технология EDGE.....	105
3.2. Семейство систем IMT-2000.....	106
3.2.1. CDMA2000.....	109
3.2.2. Стандарт UMTS.....	112
3.2.2.1. Общая характеристика.....	112
3.2.2.2. Структура сети.....	113
3.2.2.3. Канальная структура.....	117
3.2.2.4. Технология HSDPA.....	119

РАЗДЕЛ 4. СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

ПОКОЛЕНИЯ 4G.....	122
4.1. Сравнение стандартов LTE и WiMax.....	122

4.2. Технологии 4G.....	125
4.2.1. Технология OFDMA	125
4.2.2. Технология передачи данных MIMO.....	127
4.3. Структура сети стандарта WiMax	131
4.4. Организация сетей LTE	133
4.4.1. Архитектура сети стандарта LTE.....	133
4.4.2. Канальная структура сетей LTE	136
4.4.3. Радиоинтерфейс LTE.....	138
4.4.3.1. Использование технологии MIMO в LTE.....	141
4.4.3.2. Повторная передача данных в LTE	143
4.4.4. Технология передачи голоса по сети LTE.....	143
4.4.5. Стеки протоколов и услуги.....	145
4.4.6. Помехоустойчивое кодирование.....	147
ЛИТЕРАТУРА	150

Учебное издание

Буснюк Николай Николаевич
Мельянец Геннадий Иванович

СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Ю. Д. Нежикова*
Компьютерная верстка *А. А. Селиванова*
Корректор *Ю. Д. Нежикова*

Подписано в печать 12.12.2018. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 9,0. Уч.-изд. л. 9,2.
Тираж 70 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.