

Федеральное агентство связи
Федеральное государственное
образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
(ФГОБУ ВПО «СибГУТИ»)

Б.Н. Маглицкий

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОТОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Учебное пособие

*Рекомендовано УМО по образованию в области
Инфокоммуникационных технологий и систем связи в качестве
учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению подготовки 210700 – Инфокоммуникационные технологии
и системы связи квалификации (степени) «бакалавр»
и квалификации (степени) «магистр»*

Новосибирск
2013

621.396.931(024)

К.т.н. Б.Н. Маглицкий. Методы передачи данных в сотовых системах связи: Учебное пособие. – Новосибирск: СибГУТИ, 2013. – 178 стр.

В систематизированном виде рассматриваются этапы эволюционного развития технологий передачи данных в системах сотовой связи. Рассмотрены технологии передачи данных в системах сотовой связи 2-го поколения. Приведены общие характеристики стандарта GSM, описана заложенная в стандарте технология передачи данных. Описываются методы повышения скорости передачи данных HSCSD, GPRS и EDGE. На примере стандарта IS-95a и его модификаций рассмотрена архитектура сетей с кодовым разделением каналов, структура каналов трафика, передача данных по нисходящей и восходящей линиям связи. Рассмотрены концептуальные основы сетей мобильной связи 3-го поколения и пути развития этих систем. Для системы третьего поколения UMTS приведена архитектура сети радиодоступа, вопросы построения радиоинтерфейса и режимы его работы. Охарактеризованы различия радиоинтерфейсов в системах с WCDMA и системах 2-го поколения. Рассмотрен радиоинтерфейс cdma2000, проведено сравнение технологий WCDMA и cdma2000. Дана характеристика технологии HSPA в сетях сотовой связи UMTS, рассмотрены технологии передачи данных OFDM и MIMO, применяемые в сотовых системах 4-го поколения. Описаны принципы строения радиоинтерфейса по технологии LTE, особенности технологии OFDM в нисходящем канале, формирование сигнала в нисходящем канале, особенности технологии OFDM в восходящем канале, применение технологии MIMO в LTE. Проведен сравнительный анализ спектральной эффективности систем мобильной связи и широкополосного доступа.

Рецензенты: проф. Пальчун Ю.А., доц. Сорокин А.С.

Кафедра СРС

Ил.- 72, табл.- 32, список лит.- 40 наим.

Для специальностей 210400 - Телекоммуникации дневной и заочной формы обучения

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве учебного пособия.

© Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики, 2013

Оглавление

1 Введение.....	5
2 Эволюция технологий передачи данных в сотовых системах связи.....	8
2.1 Контрольные вопросы.....	12
3 Технологии передачи данных в системах сотовой связи 2-го поколения стандарта GSM.....	13
3.1 Общие характеристики стандарта GSM – 900.....	13
3.2 Структура TDMA кадров и формирование сигналов в стандарте GSM.....	14
3.3 Основы архитектуры стандарта GSM.....	18
3.4 Сетевые и радиointерфейсы.....	22
3.4.1 Интерфейсы с внешними сетями.....	23
3.4.2 Внутренние GSM – интерфейсы.....	23
3.4.3 Интерфейсы между сетью GSM и внешним оборудованием...	25
3.5 Передача данных в сети GSM.....	25
3.5.1 Передача данных через сети GSM и PSTN.....	27
3.5.2 Передача данных через сети GSM и ISDN.....	28
3.5.3 Взаимодействие сетей GSM и PSPDN.....	29
3.6 Технологии передачи информации в сетях сотовой связи.....	30
3.7 Направления развития технологий передачи данных в сетях GSM.....	31
3.8 Технология передачи данных HSCSD.....	32
3.9 Технология передачи данных GPRS.....	35
3.9.1 Общие сведения.....	35
3.9.2 Физический уровень GPRS.....	39
3.10 Технология EDGE.....	51
3.11 Контрольные вопросы.....	56
4 Передача данных в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов.....	57
4.1 Стандарты систем сотовой связи, использующие технологии CDMA.....	57
4.2 Каналы передачи данных в стандарте IS – 95a.....	59
4.2.1 Общие сведения о стандарте IS – 95a.....	59
4.2.2 Архитектура сети CDMA IS-95.....	63
4.2.3 Каналы в системе сотовой связи стандарта IS-95.....	65
4.2.3.1 Прямой канал связи.....	65
4.2.3.2 Обратный канал связи.....	75
4.2.3.3 Формирование канала трафика (прямой канал).....	79
4.2.3.4 Формирование канала трафика (обратный канал).....	80
4.2.4 Режимы работы каналов трафика.....	84
4.2.5 Передача данных по восходящей линии связи.....	87
4.2.6 Усовершенствованная версия системы IS-95b для	

высокоскоростной передачи данных.....	89
4.3 Контрольные вопросы.....	91
5 Передача данных в сотовых системах третьего поколения.....	92
5.1 Концепция IMT – 2000.....	92
5.1.1 Мировые тенденции развития рынка телекоммуникаций.....	93
5.1.2 Концептуальные основы сетей мобильной связи третьего поколения.....	93
5.1.3 Пути развития сетей 3-го поколения.....	96
5.1.4 Требования по пропускной способности канала связи при предоставлении типовых видов услуг на основе передачи данных для систем 3G.....	98
5.2 Система третьего поколения UMTS.....	99
5.2.1 Общие сведения.....	99
5.2.2 Архитектура сети радиодоступа UMTS.....	101
5.2.3 Радиоинтерфейс наземного радиодоступа UMTS.....	104
5.2.3.1 Режим UTRA FDD.....	107
5.2.3.2 Различия по радиоинтерфейсам между WCDMA и системами второго поколения.....	113
5.2.3.3 Режим UTRA TDD.....	116
5.3 Радиоинтерфейс cdma2000.....	125
5.4 Сравнение технологий WCDMA и cdma2000.....	128
5.5 Технология HSPA в сетях сотовой связи UMTS.....	130
5.6 Контрольные вопросы.....	132
6 Технологии передачи данных в сотовых системах четвертого поколения	133
6.1 Общие сведения.....	133
6.2 Технологии передачи данных в системах сотовой связи 4G.....	133
6.2.1 Технология OFDM	133
6.2.2 Технология MIMO.....	140
6.3 Принципы построения радиоинтерфейса по технологии LTE.....	145
6.3.1 Особенности технологии OFDM в нисходящем канале.....	152
6.3.2 Формирование сигнала в нисходящем канале.....	154
6.3.3 Особенности технологии OFDM в восходящем канале.....	155
6.3.4 Применение технологии MIMO в LTE.....	162
6.4 Контрольные вопросы.....	164
7 Спектральная эффективность систем мобильной связи.....	165
7.1 Общие сведения.....	165
7.2 Сравнительный анализ спектральной эффективности систем мобильной связи и широкополосного доступа.....	166
7.3 Контрольные вопросы.....	168
8 Библиография.....	169
9 Терминология и основные определения	171

1 Введение

Большая часть инфокоммуникационных услуг базируется на передаче данных и их реализация до некоторого времени была возможной лишь в фиксированных сетях, что явно недостаточно для формирования глобального информационного общества. В этой связи большую значимость имеют технологии передачи данных в сетях сотовой связи, которые постоянно развиваются и совершенствуются.

Первые сотовые сети были построены с использованием аналоговых стандартов — стандартов первого поколения. Самые распространенные из них — NMT и AMPS. Сеть на основе стандарта NMT (Nordic Mobile Telephone) — первого стандарта сотовой связи — начала работать в странах Северной Европы в 1981 году. Также NMT был первым стандартом мобильной связи, используемым в России (1991) и в США.

В сетях второго поколения данные между базовыми станциями и мобильными телефонами передаются в цифровом виде. Это позволяет использовать в стандартах DAMPS и пришедшему ему на смену GSM временное разделение (TDMA, Time Division Multiple Access, одновременный доступ с разделением по времени) — каждый частотный канал разделен на несколько так называемых «таймслотов», т. е. интервалов времени, в течение которых канал занимает один телефон. В стандарте CDMA (Code Division Multiple Access, одновременный доступ с разделением по коду) используются более сложные методы разделения каналов между различными мобильными телефонами. Самым популярным стандартом сотовой связи является стандарт второго поколения GSM — Global System for Mobile Communications (Глобальная система мобильной связи). Мобильными телефонами этого стандарта сейчас пользуются более миллиарда человек во всем мире.

Но главным следствием перехода к цифровой форме сигнала стала возможность использовать мобильные телефоны для передачи не только голоса (звука), но и других видов информации. Первой подобной услугой, сделавшей возможным передачу текста между мобильными телефонами, был так называемый «сервис коротких сообщений» — Short Message Service (сокращенно SMS). SMS впервые появился в стандарте GSM (в декабре 1992 в сети британского оператора Vodafone был произведен эксперимент по рассылке SMS), но позднее был реализован и в сетях на основе других стандартов. С помощью технологии SMS можно передавать не только короткие текстовые сообщения, но и простые картинки и звуки, а также выражать свои эмоции с помощью специальных изображений — смайликов (от smile — улыбка). Для этого используются технологии EMS и Nokia Smart Messaging.

Позднее, с совершенствованием мобильных телефонов и развитием компьютеризации, в сетях GSM были введены технологии для передачи компьютерных данных, доступа к сети Интернет. Первой такой технологией была CSD (Circuit Switched Data, передача данных через прямое подключение), в которой

выделенный телефону таймслот используется для передачи данных со скоростью 9.6 килобит в секунду — таймслот выделяется точно так же, как и при совершении телефонных звонков. При этом телефон нельзя использовать по своему прямому назначению. Для увеличения скорости передачи была создана технология HSCSD (High Speed CSD, высокоскоростная CSD) — телефон получает несколько таймслотов сразу, также применяется специальный алгоритм для коррекции ошибок в зависимости от качества соединения. При использовании этой технологии в соте может не хватить таймслотов для всех мобильных телефонов, поэтому она не стала распространенной.

Самой распространенной технологией передачи данных является GPRS (General Packet Radio Service, служба пакетной радиопередачи данных общего пользования), которая позволяет использовать выделенные таймслоты сразу нескольким мобильным телефонам, использует различные алгоритмы при разном качестве связи с БС, различной загруженности БС. Каждый телефон использует различное количество таймслотов, освобождая их при отсутствии необходимости или запрашивая новые. Таймслоты делятся между телефонами с помощью пакетного разделения, как в компьютерных сетях. Количество таймслотов, которое может использовать телефон, ограничено аппаратно, и зависит от класса GPRS мобильного телефона. Скорость передачи асимметрична — если для получения информации телефон может использовать до 4-х таймслотов при 8-м и 10-м классах GPRS, то для передачи всего 1-2. Теоретический предел скорости для GPRS при идеальном соединении (21,4 килобит в секунду) и 5-и выделенных таймслотах составляет 107 кбит/с. Но реально средняя скорость работы GPRS находится на уровне 56 кбит/с. Мобильным телефонам при использовании технологии GPRS выделяются IP-адреса в Интернете, в большинстве случаев не уникальные.

Дальнейшим развитием технологии GPRS стала технология EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution, повышенная скорость передачи данных для развития GSM). В этой технологии, по сравнению с GPRS, применены новые схемы кодирования информации, а также изменен алгоритм обработки ошибок (ошибочно переданные пакеты не передаются заново, передается только информация для их восстановления). В результате, максимальная скорость передачи достигает 384 килобит в секунду.

Иногда технологию GPRS называют технологией мобильной связи «поколения 2,5» — 2.5G, а технологию EDGE — технологией 2.75G.

Для сетей CDMA2000 создана технология 1xRTT, позволяющая достигать скорости 144 килобит в секунду.

Скорости передачи данных в сетях второго поколения недостаточны для реализации многих новых задач мобильной связи, в частности, передачи высококачественного видео в реальном времени (видеофонии), современных фотореалистичных компьютерных игр через Интернет и других.

В конце 1990-х годов в Японии и Южной Корее появились сети третьего поколения. Основное отличие стандартов, на которых построены сети 3G, от

предшественников – расширенные возможности скоростной передачи данных, что позволяет реализовывать в таких сетях новые сервисы, в частности, видеотелефонию. В 2002–2003 годах первые коммерческие сети 3G начали работать и в некоторых странах Западной Европы.

Хотя в настоящее время сети 3G существуют в ряде регионов мира, в инженерно-технических лабораториях крупнейших компаний уже ведутся работы по созданию стандартов сотовой связи четвертого поколения. Во главу угла при этом ставится не только дальнейшее увеличение скорости передачи данных, но и повышение эффективности использования пропускной способности частотных диапазонов, выделенных для мобильной связи, чтобы получить доступ к сервисам могло большое количество абонентов, находящихся на ограниченной территории (что особенно актуально для мегаполисов).

Четвертое поколение мобильных телекоммуникаций (4G) – это эволюционное развитие 3G. Инфраструктура стандарта 4G будет базироваться на IP-протоколе (Internet Protocol), что позволит обеспечивать простой и очень быстрый доступ к Интернету. Еще одним важным свойством 4G является то, что он должен стать единым стандартом. То есть не будет деления на GSM, CDMA, UMTS, WCDMA и так далее. Задача потенциального абонента будет заключаться в выборе оператора и сотового телефона, тогда как сегодня еще нужно выбирать и стандарт.

В учебном пособии в систематизированном виде рассматриваются технологии передачи данных в сотовых системах связи на различных этапах их развития.

2 Эволюция технологий передачи данных в сотовых системах связи

Системы сотовой связи появились в 80-х годах прошлого столетия. Первые системы сотовой связи были аналоговыми, и основной услугой, которую они предоставляли, была телефония. В те времена этого было вполне достаточно. Однако с ростом объемов передаваемой по телекоммуникационным системам информации возрастала потребность в услуге мобильной передачи данных. В конце 80-х – начале 90-х годов передача данных преимущественно была необходима для отправки факсов и текста. Однако к концу 90-х годов все большую популярность приобретает сеть Интернет, что вызывает потребность в увеличении скорости и удешевлении передачи данных.

В развитии систем сотовой связи можно выделить несколько поколений (рисунок 2.1).

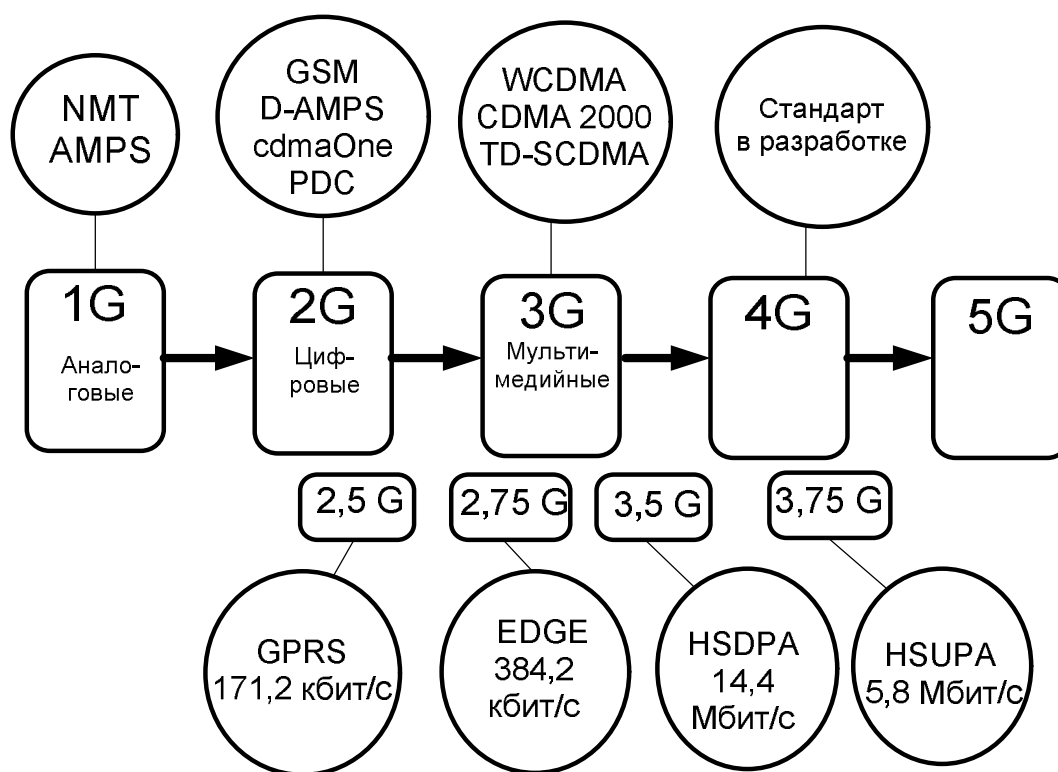


Рисунок 2.1 – Эволюция поколений сотовой связи

В стандартах систем 1-го поколения не было специальных каналов передачи данных, и поэтому аналоговые сотовые сети было невозможно подключить к различным сетям передачи данных.

Цифровые стандарты второго поколения позволяют передавать как телефонию, так и данные, организовать взаимодействие с сетями ISDN и пакетными сетями передачи данных, обеспечивают шифрование передаваемых сообщений (GSM, D-AMPS, cdmaOne, PDC).

Сети мобильной связи GSM создавались с учетом оказания основной услуги – речевой. Так как речевой трафик считается симметричным, то за основу построения сетей радиодоступа был выбран метод частотного дуплекса

FDD. Простая интеграция с телефонными сетями общего пользования PLMN, обеспечивающая высокие темпы развертывания сетей GSM в мире, потребовала от разработчиков реализации широко используемого принципа коммутации каналов CS (Circuit Switching) и системы сигнализации SS7.

Несмотря на наличие в системе GSM большого количества услуг, связанных с передачей данных, их основным недостатком считается низкая скорость передачи. Данные передаются внутри разговорных каналов.

Соответственно, скорость ограничена пропускной способностью одного таймслота. Она реализовывалась на основе технологии CSD (Circuit Switched Data) с максимальной скоростью 9,6 кбит/сек.

Данные в случае с коммутируемым соединением передаются по разговорным каналам вплоть до MSC и коммутируются через него в направлении к другим сетям передачи данных. При этом максимальная суммарная скорость строго ограничена скоростью передачи по отдельным таймслотам. Чтобы увеличить максимально-возможную скорость, необходимо отделить передаваемые данные от голоса еще до центрального коммутатора. Кроме того, нужно изменить способ кодирования информации на радиointерфейсе между базовой станцией и телефоном абонента. Этой скорости недостаточно для Интернет – приложений, и соединение, вследствие его продолжительности, становится слишком дорогим. Для улучшения возможности передачи данных в рамках системы GSM было найдено два решения:

- увеличение скорости передачи данных при внесении в систему минимальных изменений. При этом одному соединению выделяется несколько временных слотов в одном кадре. В данном случае обеспечивается сохранение связи с коммутацией каналов при увеличении емкости соединения;

- увеличение эффективности использования ресурсов системы путем внедрения коммутации пакетов с возможностью выделения нескольких временных слотов кадра для передачи пакета данных. В этом случае требуется внесение существенных изменений в структуру и организацию работы системы.

Первый подход получил название услуги высокоскоростной передачи данных с коммутацией каналов (High-Speed Circuit-Switched Data Service-HSCSD). С помощью технологии HSCSD скорость передачи данных могла быть увеличена до 57,6 кбит/сек. Это достигается за счет возможности объединения нескольких свободных тайм-слотов для передачи данных одного абонента.

Развитие дополнительных услуг связи инициировало другие асимметричные типы трафика: потоковый, фоновый и в некоторых случаях интерактивный. Кроме того, гигантские темпы развития и эффективность сети Интернет показали высокую актуальность построения сетей по принципу коммутации пакетов PS (Packet Switching). В связи с этим современные сети мобильной связи поддерживают метод временного дуплекса TDD, их развитие строится с учетом концепции «все по IP».

Решить проблему узкого канала сетей GSM был призван стандарт GPRS (General Packet Radio Service), известный как 2,5G или поколение «два с половиной». Такое название он получил по той причине, что стал промежуточным между вторым (2G) и третьим (3G) поколением.

Передаваемые данные отделяются от остального трафика в контроллере базовых станций, в котором необходима замена программного обеспечения и некоторые аппаратные доработки. Скорость передачи данных в сетях GPRS может достигать 171,2 кбит/сек.

Следующим шагом увеличения скорости передачи данных стало изменение способа модуляции при передаче данных. Благодаря этому скорость была увеличена до 384,2 кбит/сек. Эта технология получила название EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution).

Эксплуатация систем сотовой связи второго поколения показала заинтересованность абонентов в высокоскоростной передаче данных, что создало предпосылку для появления стандарта третьего поколения – UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Максимальная скорость передачи данных для данного стандарта ограничивается 2 Мбит/сек. Такое увеличение скорости, прежде всего, обусловлено изменениями в способе передачи данных между базовой станцией и терминалом абонента. Следующим шагом стало появление технологии HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), которая предоставляет скорости передачи данных уже до 14,4 Мбит/сек. Изменению в данном случае подвергся способ модуляции данных на пути от базовой станции к телефону. Таким образом, благодаря технологии HSDPA сотовые сети связи практически сравнялись по скорости с проводными технологиями.

HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) – это технология скоростной передачи данных в направлении uplink, т.е. от мобильного оборудования к базовой станции для стандарта сотовой связи UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Эта технология наряду с HSDPA входит в семейство технологий высокоскоростной передачи данных HSPA (High Speed Packet Access). Максимально возможная скорость передачи данных для HSUPA составляет 5,7 Мбит/сек. Релиз R99 (первый релиз стандарта UMTS) предусматривает скорость передачи данных в uplink до 384 кбит/сек. Этого вполне достаточно для видеозвонков, загрузки небольших файлов, передачи MMS. Однако в последнее время все большие обороты набирают социальные сетевые ресурсы, в которых важна загрузка фото, видео и др. файлов средней и большой емкости и предлагаемой скорости передачи данных в сотни килобит в секунду в таком случае становится недостаточно. Решение этой проблемы как раз и предлагает технология HSUPA, предоставляющая более чем в 10 раз большие скорости. Разработкой этой технологии занимается организация по стандартизации 3GPP (Third Generation Partnership Project) и разработка первой версии HSUPA была закончена в 2004 году. Первая сеть с технологией HSUPA впервые была запущена в начале 2007 года.

Однако объемы передаваемой информации по телекоммуникационным сетям увеличивается ежегодно и даже технология HSDPA перестанет удовлетворять потребности пользователей. Чтобы на долгое время вперед решить про-

блему пропускной способности был разработан стандарт четвертого поколения, который получил название LTE (Long Term Evolution). Кроме увеличения скорости данный стандарт позволяет увеличить емкость сети, повысить качество и усилить безопасность. Максимальная скорость передачи теоретически может достигать 326,4 Мбит/сек. Подобные скорости может предложить разве что оптоволоконная система связи. В декабре 2009 года была запущена в коммерческую эксплуатацию первая система сотовой связи этого стандарта.

Таким образом, за три десятилетия скорости передачи информации по сотовым сетям связи увеличились в сотни тысяч раз. Конечно, представленные скорости лишь теоретически достижимы. На практике реальная скорость, как правило, в два, а то и в три раза меньше максимальной. Но эти цифры помогают оценить скорость эволюции технологий, хотя здесь в пору термин революции. Ниже в таблице 2.1 представлены все упомянутые технологии, отсортированные в порядке увеличения скорости.

Таблица 2.1 – Скорости передачи данных в сотовых системах

Технология передачи данных	Скорость передачи
CSD	9,6 кбит/сек
HSCSD	57,6 кбит/сек
GPRS	171,2 кбит/сек
EDGE	384,2 кбит/сек
UMTS	2 Мбит/сек
HSDPA	14,4 Мбит/сек
HSUPA	5,8 Мбит/с
LTE	326,4 Мбит/сек

Рассмотренные методы повышения скорости передачи данных в сотовых системах связи можно классифицировать следующим образом (рисунок 2.2).

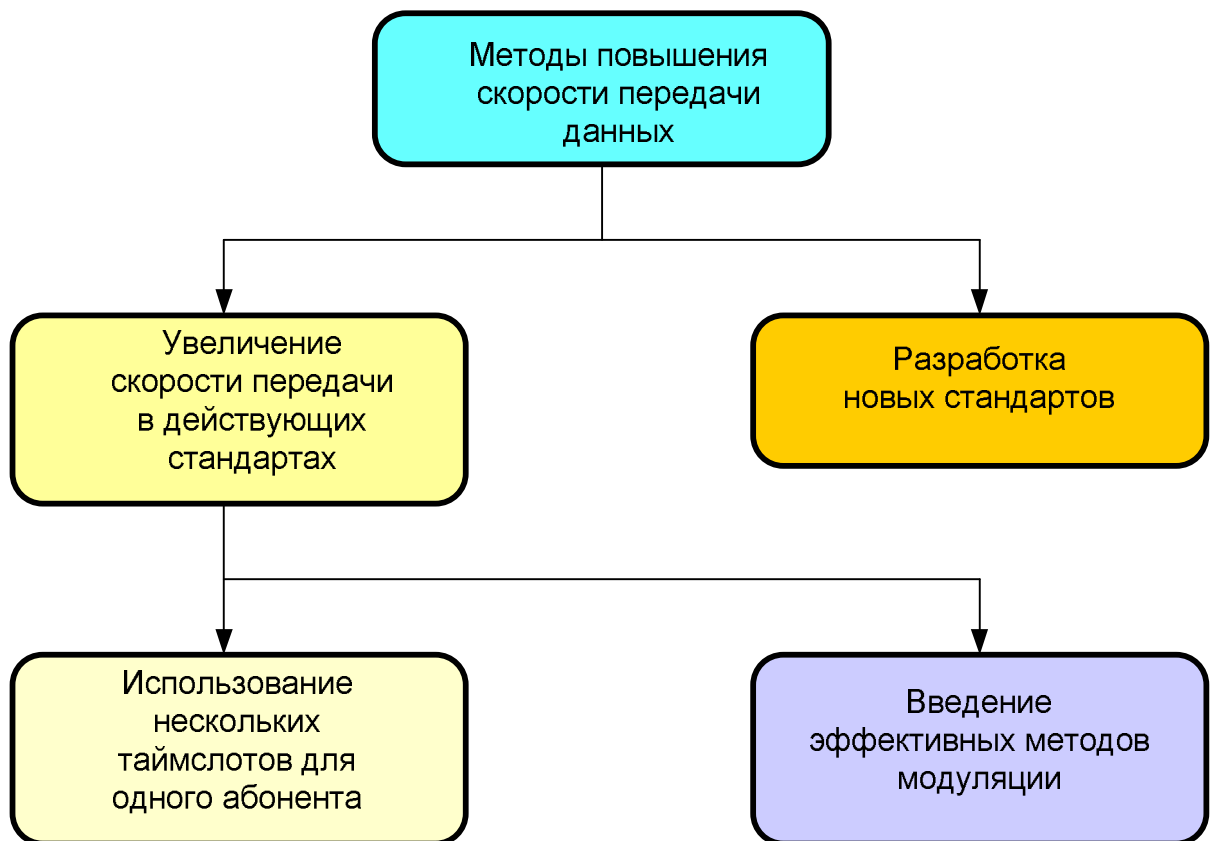


Рисунок 2.2 – Классификация методов повышения скорости передачи данных в сотовых системах связи

2.1 Контрольные вопросы

1. В чем заключается основное преимущество цифровых стандартов по сравнению с аналоговыми?
2. Поясните сущность технологии GPRS.
3. Поясните суть технологии EDGE.
4. Назовите основные стандарты систем сотовой связи третьего поколения.
5. Какие скорости передачи информации обеспечиваются в сетях четвертого поколения?
6. Поясните сущность технологии HSDPA.
7. Поясните сущность технологии HSUPA.

3 Технологии передачи данных в системах сотовой связи 2-го поколения стандарта GSM

Рассмотрим технологии передачи данных на примере стандарта GSM – 900.

3.1 Общие характеристики стандарта GSM - 900

В соответствии с рекомендацией СЕРТ 1980 г., касающейся использования спектра частот подвижной связи в диапазоне частот 862-960 МГц, стандарт GSM на цифровую общеевропейскую (глобальную) сотовую систему наземной подвижной связи предусматривает работу передатчиков в двух диапазонах частот: 890-915 МГц (для передатчиков подвижных станций - MS), 935-960 МГц (для передатчиков базовых станций - BTS) [10].

В стандарте GSM используется узкополосный многостанционный доступ с временным разделением каналов (NB TDMA). В структуре TDMA кадра содержится 8 временных позиций на каждой из 124 несущих.

Для защиты от ошибок в радиоканалах при передаче информационных сообщений применяется блочное и сверточное кодирование с перемежением. Повышение эффективности кодирования и перемежения при малой скорости перемещения подвижных станций достигается медленным переключением рабочих частот (SFH) 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 среднеквадратическим отклонением времени задержки до 16 мкс.

Система синхронизации рассчитана на компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс, что соответствует максимальной дальности связи или максимальному радиусу ячейки (соты) 35 км.

В стандарте GSM выбрана гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (GMSK). Обработка речи осуществляется в рамках принятой системы прерывистой передачи речи (DTX), которая обеспечивает включение передатчика только при наличии речевого сигнала и отключение передатчика в паузах и в конце разговора. В качестве речепреобразующего устройства выбран речевой кодек с регулярным импульсным возбуждением/долговременным предсказанием и линейным предикативным кодированием с предсказанием (RPE/LTR-LTP-кодек). Общая скорость преобразования речевого сигнала - 13 кбит/с.

В стандарте GSM достигается высокая степень безопасности передачи сообщений; осуществляется шифрование сообщений по алгоритму шифрования с открытым ключом (RSA).

В целом система связи, действующая в стандарте GSM, рассчитана на ее использование в различных сферах. Она предоставляет пользователям широкий

диапазон услуг и возможность применять разнообразное оборудование для передачи речевых сообщений и данных, вызывных и аварийных сигналов; подключаться к телефонным сетям общего пользования (PSTN), сетям передачи данных (PDN) и цифровым сетям с интеграцией служб (ISDN).

Основные характеристики стандарта GSM:

Частоты передачи подвижной станции приема базовой станции, МГц	890-915
Частоты приема подвижной станции и передачи базовой станции, МГц.....	935-960
Дуплексный разнос частот приема и передачи, МГц.....	45
Скорость передачи сообщений в радиоканале, кбит/с.....	270, 833
Скорость преобразования речевого кодека, кбит/с.....	13
Ширина полосы канала связи, кГц.....	200
Максимальное количество каналов связи.....	124
Максимальное количество каналов, организуемых в базовой станции.....	16-20
Вид модуляции.....	GMSK
Индекс модуляции.....	BT = 0,3
Ширина полосы предмодуляционного гауссовского фильтра, кГц....	81,2
Количество скачков по частоте в секунду.....	217
Временное разнесение в интервалах TDMA кадра (передача/прием) для подвижной станции.....	2
Вид речевого кодека.....	RPE/LTP
Максимальный радиус соты, км.....	до 35
Схема организации каналов комбинированная TDMA/FDMA	

3.2 Структура TDMA кадров и формирование сигналов в стандарте GSM

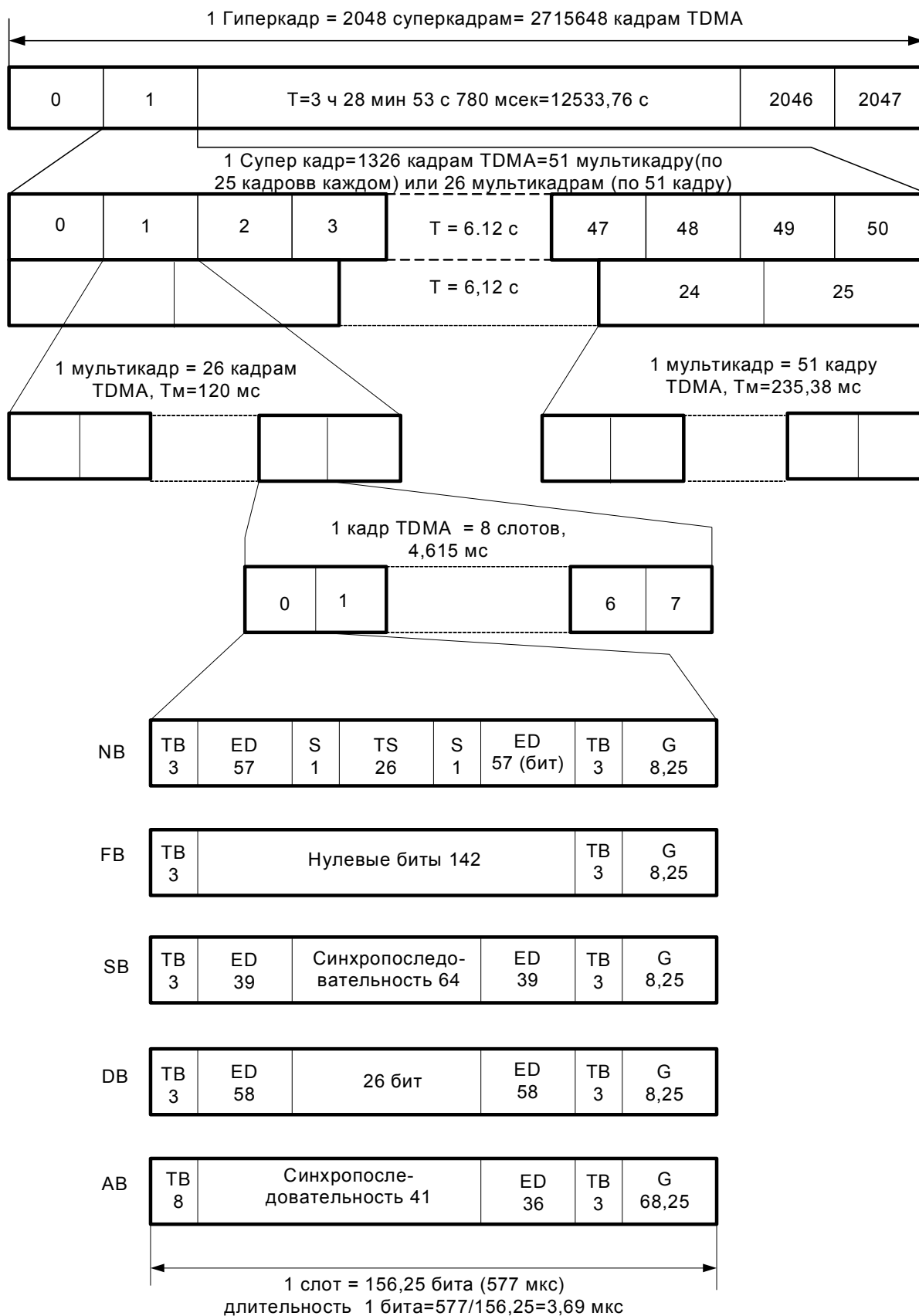
В результате анализа различных вариантов построения цифровых сотовых систем подвижной связи (ССПС) в стандарте GSM принят многостанционный доступ с временным разделением каналов (TDMA). Общая структура временных кадров показана на рисунке 3.1[24]. Длина периода последовательности в этой структуре, которая называется гиперкадром, равна $T_g = 3 \text{ ч } 28 \text{ мин } 53 \text{ с } 760 \text{ мс}$ (12533,76 с). Гиперкадр делится на 2048 суперкадров, каждый из которых имеет длительность $T = 12533,76/2048 = 6,12 \text{ с}$.

Суперкадр состоит из мультикадров. Для организации различных каналов связи и управления в стандарте GSM используются два вида мультикадров:

- 1) 26-позиционные TDMA кадры мультикадра;
- 2) 51-позиционные TDMA кадры мультикадра.

Суперкадр может содержать в себе 51 мультикадр первого типа или 26 мультикадров второго типа. Длительности мультикадров соответственно:

- 1) $T_m = 6120/51 = 120 \text{ мс}$;



$$AB = 8 + 41 + 36 + 3 + 68,25 = 3,69 \text{ мкс}$$

Рисунок 3.1 – Структура временных кадров

2) $T_m = 6120/26 = 235,385$ мс ($3060/13$ мс). Длительность каждого TDMA кадра $T_k = 120/26 = 235,385/51 = 4,615$ мс ($60/13$ мс).

В периоде последовательности каждый TDMA кадр имеет свой порядковый номер (NF) от 0 до NF_{\max} , где $NF_{\max} = (26 \times 51 \times 2048) - 1 = 2715647$.

Таким образом, гиперкадр состоит из 2715647 TDMA кадров. Необходимость такого большого периода гиперкадра объясняется требованиями применяемого процесса криптографической защиты, в котором номер кадра NF используется как входной параметр. TDMA кадр делится на восемь временных позиций с периодом

$$T_o = 60/13:8 = 576,9 \text{ мкс (15/26 мс)}$$

Каждая временная позиция обозначается TN с номером от 0 до 7. Физический смысл временных позиций, которые иначе называются окнами, - время, в течение которого осуществляется модуляция несущей цифровым информационным потоком, соответствующим речевому сообщению или данным.

Цифровой информационный поток представляет собой последовательность пакетов, размещаемых в этих временных интервалах (окнах). Пакеты формируются немного короче, чем интервалы, их длительность составляет 0,546 мс, что необходимо для приема сообщения при наличии временной дисперсии в канале распространения.

Информационное сообщение передается по радиоканалу со скоростью 270,833 кбит/с. Это означает, что временной интервал TDMA кадра содержит 156,25 бит.

Длительность одного информационного бита $576,9 \text{ мкс}/156,25 = 3,69$ мкс. Каждый временной интервал, соответствующий длительности бита, обозначается BN с номером от 0 до 155; последнему интервалу длительностью 1/4 бита присвоен номер 156.

Для передачи информации по каналам связи и управления, подстройки несущих частот, обеспечения временной синхронизации и доступа к каналу связи в структуре TDMA кадра используются пять видов временных интервалов (окон).

NB используется для передачи информации по каналам связи и управления, за исключением канала доступа RACH. Он состоит из 114 бит зашифрованного сообщения и включает защитный интервал (GP) в 8,25 бит длительностью 30,46 мкс. Информационный блок 114 бит разбит на два самостоятельных блока по 57 бит, разделенных между собой обучающей последовательностью в 26 бит, которая используется для установки эквалайзера в приемнике в соответствии с характеристиками канала связи в данный момент времени.

В состав NB включены два контрольных бита (Stealing Flag), которые служат признаком того, содержит ли передаваемая группа речевую информацию или информацию сигнализации. В последнем случае информационный канал (Traffic Channel) "украден" для обеспечения сигнализации.

Между двумя группами зашифрованных бит в составе NB находится обучающая последовательность из 26 бит, известная в приемнике. С помощью этой последовательности обеспечивается:

- оценка частоты появления ошибок в двоичных разрядах по результатам сравнения принятой и эталонной последовательностей. В процессе сравнения вычисляется параметр RXQUAL, принятый для оценки качества связи. Конечно, речь идет только об оценке связи, а не о точных измерениях, так как проверяется только часть передаваемой информации. Параметр RXQUAL используется при вхождении в связь, при выполнении процедуры "эстафетной передачи" (Handover) и при оценке зоны покрытия радиосвязью;

- оценка импульсной характеристики радиоканала на интервале передачи NB для последующей коррекции тракта приема сигнала за счет использования адаптивного эквалайзера в тракте приема;

- определение задержек распространения сигнала между базовой и подвижной станциями для оценки дальности связи. Эта информация необходима для того, чтобы пакеты данных от разных подвижных станций не накладывались при приеме на базовой станции. Поэтому удаленные на большее расстояние подвижные станции должны передавать свои пакеты раньше станций, находящихся в непосредственной близости от базовой станции. FB предназначен для синхронизации по частоте подвижной станции. Все 142 бита в этом временном интервале - нулевые, что соответствует немодулированной несущей со сдвигом 1625/24 кГц выше номинального значения частоты несущей. Это необходимо для проверки работы своего передатчика и приемника при небольшом частотном разнеске каналов (200 кГц), что составляет около 0,022% от номинального значения полосы частот 900 МГц. FB содержит защитный интервал 8,25 бит так же, как и нормальный временной интервал. Повторяющиеся временные интервалы подстройки частоты (FB) образуют канал установки частоты (FSCN).

SB используется для синхронизации по времени базовой и подвижной станций. Он состоит из синхропоследовательности длительностью 64 бита, несет информацию о номере ТОМА кадра и идентификационный код базовой станции. Этот интервал передается вместе с интервалом установки частоты. Повторяющиеся интервалы синхронизации образуют так называемый канал синхронизации (SCH).

DB обеспечивает установление и тестирование канала связи. По своей структуре DB совпадает с NB (рис. 3.1) и содержит установочную последовательность длиной 26 бит. В DB отсутствуют контрольные биты и не передается никакой информации. DB лишь информирует о том, что передатчик функционирует.

AB обеспечивает разрешение доступа подвижной станции к новой базовой станции. AB передается подвижной станцией при запросе канала сигнализации. Это первый передаваемый подвижной станцией пакет, следовательно, время прохождения сигнала еще не измерено. Поэтому пакет имеет специфическую структуру. Сначала передается концевая комбинация 8 бит, затем - последовательность синхронизации для базовой станции (41 бит), что позволяет базовой станции обеспечить правильный прием последующих 36 зашифрованных

бит. Интервал содержит большой защитный интервал (68,25 бит, длительностью 252 мкс), что обеспечивает (независимо от времени прохождения сигнала) достаточное временное разнесение от пакетов других подвижных станций,

Этот защитный интервал соответствует двойному значению наибольшей возможной задержки сигнала в рамках одной соты и тем самым устанавливает максимально допустимые размеры соты. Особенность стандарта GSM - возможность обеспечения связи подвижных абонентов в сотах с радиусом около 35 км. Время распространения радиосигнала в прямом и обратном направлениях составляет при этом 233,3 мкс.

Одна из особенностей формирования сигналов в стандарте GSM - использование медленных скачков по частоте в процессе сеанса связи. Главное назначение таких скачков (SFH - Slow Frequency Hopping) - обеспечение частотного разнесения в радиоканалах, функционирующих в условиях многолучевого распространения радиоволн. SFH используется во всех подвижных сетях, что повышает эффективность кодирования и перемежения при медленном движении абонентских станций. Принцип формирования медленных скачков по частоте состоит в том, что сообщение, передаваемое в выделенном абоненту временном интервале TDMA кадра (577 мкс), в каждом последующем кадре передается (принимается) на новой фиксированной частоте. В соответствии со структурой кадров время для перестройки частоты составляет около 1 мс.

В процессе скачков по частоте постоянно сохраняется дуплексный разнос 45 МГц между каналами приема и передачи. Всем активным абонентам, находящимся в одной соте, ставятся в соответствие ортогональные формирующие последовательности, что исключает взаимные помехи при приеме сообщений абонентами в соте. Параметры последовательности переключения частот (частотно-временная матрица и начальная частота) назначаются каждой подвижной станции в процессе установления канала. Ортогональность последовательностей переключения частот в соте обеспечивается начальным частотным сдвигом одной и той же (по алгоритму формирования) последовательности. В смежных сотах используются различные формирующие последовательности.

Для сравнения можно отметить, что по результатам экспериментальных исследований, проведенных на действующих сетях GSM, пространственное разнесение приемных антенн на базовой станции дает выигрыш 3-4 дБ.

Принятая структура TDMA кадров и принципы формирования сигналов в стандарте GSM в совокупности с методами капельного кодирования позволили снизить требуемое для приема отношение сигнал/помеха до 9 дБ, тогда как в стандартах аналоговых сотовых сетей связи оно составляет 17-18 дБ.

3.3 Основы архитектуры стандарта GSM

Зона обслуживания системы GSM разделена на фрагменты (рисунок 3.2), каждый из которых обслуживает *центр коммутации подвижной связи (Mobile Switching Center – MSC)* [26].

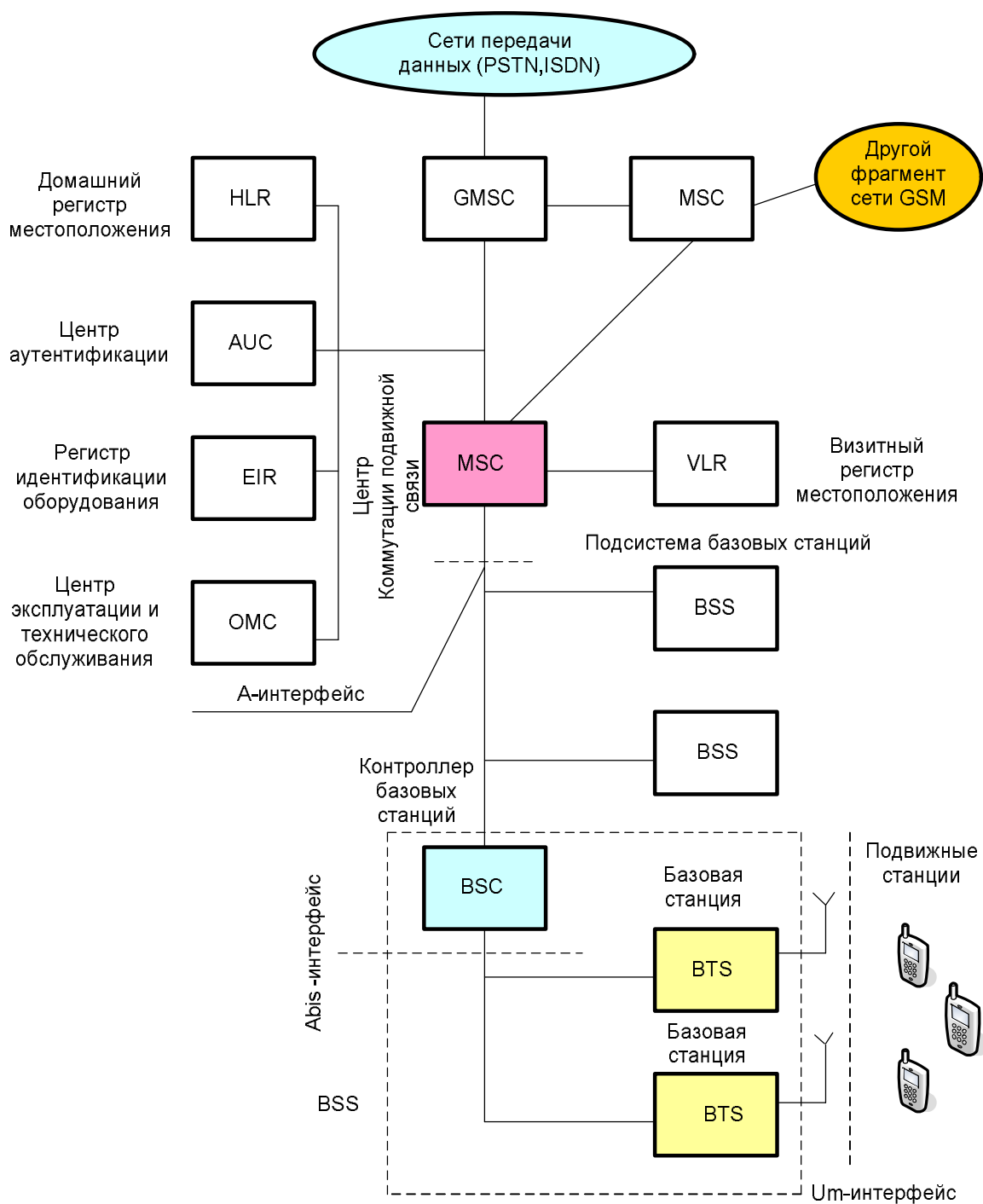


Рисунок 3.2 – Обобщенная структура системы GSM

MSC представляет собой специализированный центр электронной коммутации, к которому добавлены функциональные блоки, решающие задачи, характерные для сотовой связи. Каждый центр MSC соединен с соответствующим *визитным регистром местоположения* (*Visitor Register - VLR*). Этот регистр содержит необходимую информацию о подвижных станциях, временно расположенных в зоне обслуживания местного MSC.

Кроме VLR система GSM каждого оператора оборудована тремя другими регистрами:

- **HLR** (Home Location Register) – домашний регистр местоположения – база данных подвижных станций, постоянно зарегистрированных в системе конкретного оператора;
- **AUC** (Authentication Center)- база данных, позволяющая определить, разрешен ли доступ к услугам системы абоненту, имеющему данный модуль подлинности – SIM карту (Subscriber Identity Mobile);
- **EIR** (Equipment Identification Register) - база данных серийных номеров подвижных станций, используемых в системе. Номера украденных или потерянных телефонов помещаются в черный список, что позволяет предотвратить дальнейшее использование в системе этих телефонов.

Регистр HLR представляет собой центральную базу данных, в которой хранятся постоянные параметры пользователей и сведения об их текущем местоположении. Информация, хранящаяся в HLR, позволяет системе установить соединение с пользователями, даже если они в этот момент временно зарегистрированы в другой сети GSM. Запись о пользователе содержит также перечень дополнительно используемых им услуг и ключи шифрования для цифровой передачи данных и идентификации пользователя.

HLR и VLR обмениваются данными об абонентах, расположены в данный момент в зоне обслуживания данного VLR. Такое взаимодействие позволяет определить текущее местоположение вызываемого пользователя по информации из его родного HLR и установить соединение с тем MSC, который работает совместно с регистром VLR, в настоящий момент содержащим информацию об абоненте. VLR также содержит информацию, необходимую для осуществления вызова с подвижной станции.

Центры коммутации подвижной связи MSC соединены друг с другом. Один или более MSC, называемые транзитными *центрами коммутации подвижной связи* (*Gateway Mobile Switching Center- GMSC*), играют роль шлюзов во внешние сети. Каждый MSC контролирует, по крайней мере, *одну подсистему базовых станций* (*Base Station System*), которая состоит из *контроллера базовых станций* (*Base Station Controller-BSC*) и некоторого количества *базовых станций* (*Base Transcenter Station BTS или просто BS*). Базовая станция состоит из подсистемы, выполняющей основные функции передачи и приема сигналов. А также блока, реализующего простые функции контроля и управления. В базовой станции выполняются также процедуры кодирования/декодирования речи и производится адаптация скорости передачи данных. Базовые станции располагаются обычно в центрах сот, покрывающих область обслуживания системы.

Основная задача MSC заключается в координации установления соединения между двумя мобильными абонентами или между одним пользователем системы GSM и абонентом внешней сети, например, PSTN, ISDN или *PSDN* (*Packet Switched Data Network-сеть с коммутацией пакетов данных*). Эта задача решается выполнением следующих функций:

- установление и поддержание входящих и исходящих соединений абонентов;
- динамическое управление ресурсами в зоне обслуживания данного MSC;
- перемаршрутизация соединения в новую соту, обслуживаемую другим контроллером базовых станций (*хэндовер*);
- обеспечение взаимодействия с другими сетями (в случае GMSC);
- шифрование двоичного потока данных пользователя;
- изменение выделенных BTS несущих частот, обусловленное перераспределением ресурсов системы в зависимости от конкретной нагрузки на данную часть сети.

Информационный обмен между MSC и BTS стандартизуется при помощи *A-интерфейса*, тогда как *Abis – интерфейс* стандартизует обмен данных между контроллером базовых станций и BTS.

A-интерфейс связан с сетевыми и коммутационными аспектами работы системы, например, с функциями коммутатора MSC и регистров HLR и VLR, а также: с управлением постоянными соединениями и сетью, с контролем и шифрованием информации и данных сигнализации, с обновлением данных местоположения мобильной станции и ее аутентификацией, с управлением вызовами.

Abis – интерфейс предназначен для информационного обмена, относящегося к радиопередаче. Он связан с вопросами распределения каналов, контроля соединений, организации очередей сообщений перед их отправкой, контроля скачкообразной перестройки частоты несущей, канального кодирования и декодирования, кодирования и декодирования речевых сигналов, шифрования сообщений, а также управления мощностью излучения базовой станции.

Интерфейс *Um* определяет правила информационного обмена между BTS и мобильной станцией.

Центр эксплуатации и технического обслуживания (Operation and Maintenance Center - OMC) обеспечивает работу отдельных элементов сети GSM. Он соединен со всеми элементами коммутационной сети и выполняет функции администрирования, такие, как, тарификация и мониторинг трафика, а также принимает необходимые меры в случае отказа отдельных элементов сети. Одна из наиболее важных задач OMC – это управление регистром HLR.

TCE- транскoder, обеспечивает преобразование выходных сигналов канала передачи речи и данных MSC (64 кбит/с ИКМ) к виду, соответствующему рекомендациям GSM по радиointерфейсу (Рек. GSM 04.08). В соответствии с этими требованиями скорость передачи речи, представленной в цифровой форме, составляет 13 кбит/с. Этот канал передачи цифровых речевых сигналов называется "полноскоростным". Стандартом предусматривается в перспективе использование полускоростного речевого канала (скорость передачи 6,5 кбит/с).

Снижение скорости передачи обеспечивается применением специального речепреобразующего устройства, использующего линейное предикативное кодирование (LPC), долговременное предсказание (LTP), остаточное импульсное возбуждение (RPE - иногда называется RELP).

Транскодер обычно располагается вместе с MSC, тогда передача цифровых сообщений в направлении к контроллеру базовых станций - BSC ведется с добавлением к потоку со скоростью передачи 13 кбит/с, дополнительных битов (стаффингование) до скорости передачи данных 16 кбит/с. Затем осуществляется уплотнение с кратностью 4 в стандартный канал 64 кбит/с. Так формируется определенная Рекомендациями GSM 30-канальная ИКМ линия, обеспечивающая передачу 120 речевых каналов. Шестнадцатый канал (64 кбит/с), *"временное окно"*, выделяется отдельно для передачи информации сигнализации и часто содержит трафик SS N7 или LAPD. В другом канале (64 кбит/с) могут передаваться также пакеты данных, согласующиеся с протоколом X.25 МККТТ.

Таким образом, результирующая скорость передачи по указанному интерфейсу составляет $30 \times 64 \text{ кбит/с} + 64 \text{ кбит/с} + 64 \text{ кбит/с} = 2048 \text{ кбит/с}$.

MS - подвижная станция, состоит из оборудования, которое служит для организации доступа абонентов сетей GSM к существующим фиксированным сетям электросвязи. В рамках стандарта GSM приняты пять классов подвижных станций от модели 1-го класса с выходной мощностью 20 Вт, устанавливаемой на транспортном средстве, до портативной модели 5-го класса, максимальной мощностью 0,8 Вт (таблица 3.1). При передаче сообщений предусматривается адаптивная регулировка мощности передатчика, обеспечивающая требуемое качество связи.

Таблица 3.1 – Классы мощности подвижных станций

Класс мощности	Максимальный уровень мощности передатчика, Вт	Допустимые отклонения, дБ
1	20	1,5
2	8	1,5
3	5	1,5
4	2	1,5
5	0,8	1,5

Подвижный абонент и станция независимы друг от друга. Как уже отмечалось, каждый абонент имеет свой международный идентификационный номер (IMSI), записанный на его интеллектуальную карточку. Такой подход позволяет устанавливать радиотелефоны, например, в такси и автомобилях, сдаваемых на прокат. Каждой подвижной станции также присваивается свой международный идентификационный номер (IMEI). Этот номер используется для предотвращения доступа к сетям GSM похищенной станции или станции без полномочий.

3.4 Сетевые и радиоинтерфейсы

При проектировании цифровых сотовых систем подвижной связи стандарта GSM рассматриваются интерфейсы трех видов: для соединения с внешними сетями; между различным оборудованием сетей GSM; между сетью GSM

и внешним оборудованием. Все существующие внутренние интерфейсы сетей GSM полностью соответствуют требованиям Рекомендаций ETSI/GSM 03.02.

3.4.1 Интерфейсы с внешними сетями

Соединение с PSTN:

Соединение с телефонной сетью общего пользования осуществляется MSC по линии связи 2 Мбит/с в соответствии с системой сигнализации SS N 7. Электрические характеристики 2 Мбит/с интерфейса соответствуют Рекомендациям МККТТ G.732.

Соединение с ISDN:

Для соединения с создаваемыми сетями ISDN предусматриваются четыре линии связи 2 Мбит/с, поддерживаемые системой сигнализации SS N 7 и отвечающие Рекомендациям Голубой книги МККТТ Q.701-Q.710, Q.711-Q.714, Q.716, Q.781, Q.782, Q.791, Q.795, Q.761-0.764, Q.766.

Соединение с существующей сетью NMT-450:

Центр коммутации подвижной связи соединяется с сетью NMT-450 через четыре стандартные линии связи 2 Мбит/с и системы сигнализации SS N7. При этом должны обеспечиваться требования Рекомендаций МККТТ по подсистеме пользователей телефонной сетью (TUP - Telephone User Part) и подсистеме передачи сообщений (MTP - Message Transfer Part) Желтой книги. Электрические характеристики линии 2 Мбит/с соответствуют Рекомендациям МККТТ G.732.

Соединения с международными сетями GSM:

В настоящее время обеспечивается подключение сети GSM в Москве к общеевропейским сетям GSM. Эти соединения осуществляются на основе протоколов систем сигнализации (SCCP) и межсетевой коммутации подвижной связи (GMSC).

3.4.2 Внутренние GSM – интерфейсы

Интерфейс между MSC и BSS (А-интерфейс) обеспечивает передачу сообщений для управления BSS, передачи вызова, управления передвижением. А-интерфейс объединяет каналы связи и линии сигнализации. Последние используют протокол SS N7 МККТТ. Полная спецификация А-интерфейса соответствует требованиям серии 08 Рекомендаций ETSI/GSM.

Интерфейс между MSC и HLR совмещен с VLR (В-интерфейс). Когда MSC необходимо определить местоположение подвижной станции, он обращается к VLR. Если подвижная станция инициирует процедуру местоопределения с MSC, он информирует свой VLR, который заносит всю изменяющуюся информацию в свои регистры. Эта процедура происходит всегда, когда MS переходит из одной области местоопределения в другую. В случае, если абонент запрашивает специальные дополнительные услуги или изменяет некоторые свои

данные, MSC также информирует VLR, который регистрирует изменения и при необходимости сообщает о них HLR.

Интерфейс между MSC и HLR (C-интерфейс) используется для обеспечения взаимодействия между MSC и HLR. MSC может послать указание (сообщение) HLR в конце сеанса связи для того, чтобы абонент мог оплатить разговор. Когда сеть фиксированной телефонной связи не способна исполнить процедуру установления вызова подвижного абонента, MSC может запросить HLR с целью определения местоположения абонента для того, чтобы послать вызов MS.

Интерфейс между HLR и VLR (D-интерфейс) используется для расширения обмена данными о положении подвижной станции, управления процессом связи. Основные услуги, предоставляемые подвижному абоненту, заключаются в возможности передавать или принимать сообщения независимо от местоположения. Для этого HLR должен пополнять свои данные. VLR сообщает HLR о положении MS, управляя ею и переприсваивая ей номера в процессе блуждания, посылает все необходимые данные для обеспечения обслуживания подвижной станции.

Интерфейс между MSC (E-интерфейс) обеспечивает взаимодействие между разными MSC при осуществлении процедуры HANDOVER - "передачи" абонента из зоны в зону при его движении в процессе сеанса связи без ее прерыва.

Интерфейс между BSC и BTS (A-bis интерфейс) служит для связи BSC с BTS и определен Рекомендациями ETSI/GSM для процессов установления соединений и управления оборудованием, передача осуществляется цифровыми потоками со скоростью 2,048 Мбит/с. Возможно использование физического интерфейса 64 кбит/с.

Интерфейс между BSC и OMC (O-интерфейс) предназначен для связи BSC с OMC, используется в сетях с пакетной коммутацией МККТТ X.25. Внутренний BSC-интерфейс контроллера базовой станции обеспечивает связь между различным оборудованием BSC и оборудованием транскодирования (TCE); использует стандарт ИКМ-передачи 2,048 Мбит/с и позволяет организовать из четырех каналов со скоростью 16 кбит/с один канал на скорости 64 кбит/с.

Интерфейс между MS и BTS (Um-радиоинтерфейс) определен в сериях 04 и 05 Рекомендаций ETSI/GSM.

Сетевой интерфейс между OMC и сетью, так называемый управляющий интерфейс между OMC и элементами сети, определен ETSI/GSM Рекомендациями 12.01 и является аналогом интерфейса Q.3, который определен в многоуровневой модели открытых сетей ISO OSI.

Соединение сети с OMC могут обеспечиваться системой сигнализации МККТТ SS N7 или сетевым протоколом X.25. Сеть X.25 может соединяться с объединенными сетями или с PSDN в открытом или замкнутом режимах.

GSM - протокол управления сетью и обслуживанием также должен удовлетворять требованиям Q.3 интерфейса, который определен в ETSI/GSM Рекомендациях 12.01.

3.4.3 Интерфейсы между сетью GSM и внешним оборудованием

Интерфейс между MSC и сервис-центром (SC) необходим для реализации службы коротких сообщений. Он определен в ETSI/GSM Рекомендациях 03.40. Интерфейс к другим ОМС. Каждый центр управления и обслуживания сети должен соединяться с другими ОМС, управляющими сетями в других регионах или другими сетями. Эти соединения обеспечиваются X-интерфейсами в соответствии с Рекомендациями МККТТ М.30. Для взаимодействия ОМС с сетями высших уровней используется O.3-интерфейс.

В сетях GSM используется три типа оконечного оборудования подвижной станции: МТО (Mobile Termination 0) - многофункциональная подвижная станция, в состав которой входит терминал данных с возможностью передачи и приема данных и речи; МТ1 (Mobile Termination 1) - подвижная станция с возможностью связи через терминал с ISDN; МТ2 (Mobile Termination 2) - подвижная станция с возможностью подключения терминала для связи по протоколу МККТТ V или X серий.

Терминальное оборудование может состоять из оборудования одного или нескольких типов, такого как телефонная трубка с номеронабирателем, аппаратуры передачи данных (DTE), телекс и т.д.

Различают следующие типы терминалов:

- терминальное оборудование, обеспечивающее связь с ISDN TE1 (Terminal Equipment);
- терминальное оборудование, обеспечивающее связь с любым оборудованием через протоколы МККТТ V или X серий TE2 (Terminal Equipment), связь с ISDN не обеспечивает. Терминал TE2 может быть подключен как нагрузка к МТ1 (подвижной станции с возможностью связи с ISDN) через адаптер ТА.

Система характеристик стандарта GSM, принятая функциональная схема сетей связи и совокупность интерфейсов обеспечивают высокие параметры передачи сообщений, совместимость с существующими и перспективными информационными сетями, предоставляют абонентам широкий спектр услуг цифровой связи.

3.5 Передача данных в сети GSM

Сеть GSM можно рассматривать в качестве сети доступа к другим телекоммутируемым сетям, таким, как *телефонная коммутируемая сеть общего пользования (ТФОП – Public Switched Telephone Networks - PSTN)*, *сеть передачи данных общего пользования с коммутацией каналов (Circuit Switched Public Data Network - CSPDN)* или *сеть передачи данных общего пользования с коммутацией пакетов (Packet-Switched Public Data Network-PSPDN)*.

Специфика цифровой передачи в сети GSM обуславливает необходимость стыка, который адаптирует создаваемый в сети GSM поток данных к особенностям других сетей. Поэтому центр коммутации подвижной связи MSC

оборудован модулем сопряжения, реализующим функцию межсетевого взаимодействия (*Inter Working Function - IWF*), который предназначен для конвертирования протоколов обмена данными между системой GSM и другими сетями. На рисунке 3.3 показано расположение TAF и IWF блоков в цепи передачи данных системы GSM [30].

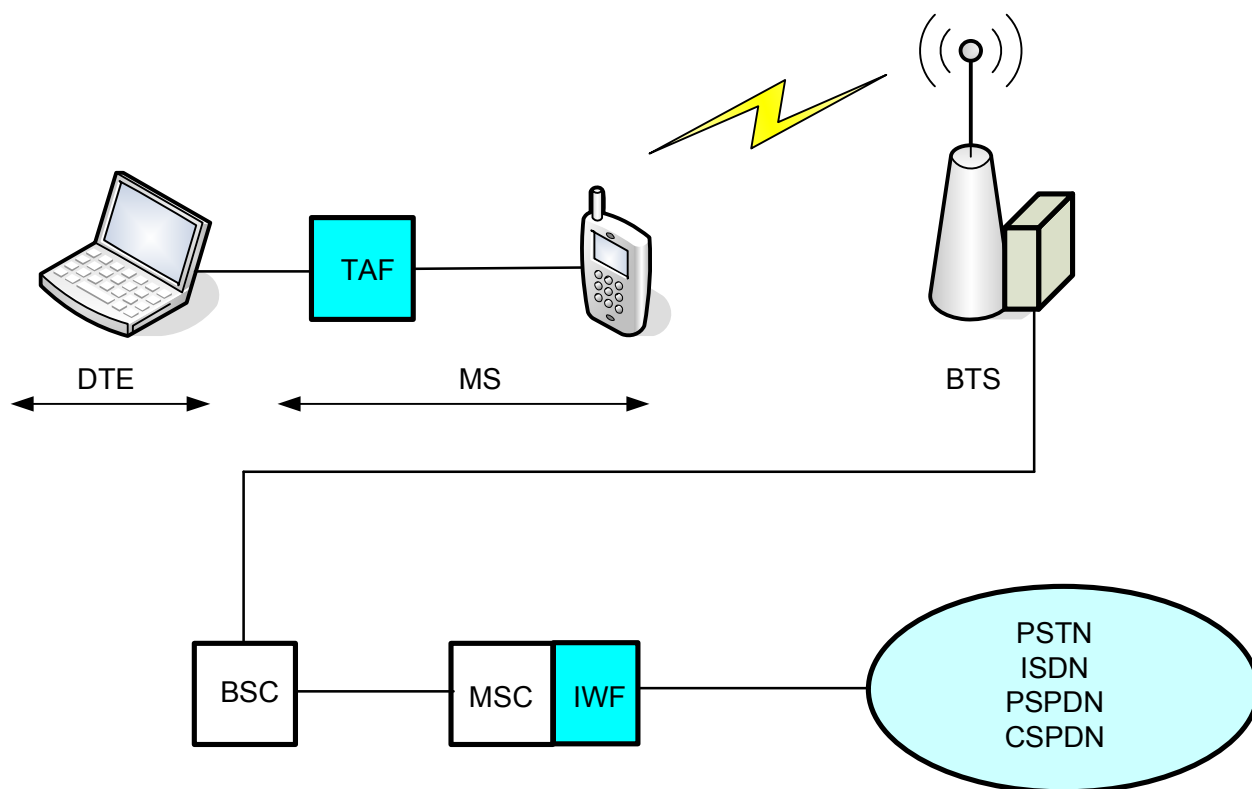


Рисунок 3.3 – Расположение блоков TAF и IWF в цепи передачи данных системы GSM

Основные задачи IWF – модуля: адаптация скорости передачи данных, выполнение процедур ARQ и реализация функций акустического модема. Так как обмен данными между терминалом GSM и терминалом, подключенным к другой сети общего пользования, может осуществляться в синхронном или асинхронном режиме со скоростями 300, 1200, 1200/75, 2400, 4800, и 9600 бит/с, то входящий в IWF-модуль акустический модем работает в соответствии с рекомендациями ITU-T V.21, V.22, V.22bis, V.23, V.26ter, а также V.29 (факсимильная передача).

На другом конце линии связи как источником, так и приемником потока данных может быть компьютер или измерительное устройство, присоединенные к подвижной станции GSM. С точки зрения обмена данными подвижные станции подразделяются на три типа, которые отличаются друг от друга расположением блока, реализующего функции *терминального адаптера (Terminal Adaptation Function - TAF)*, сопрягающего подвижную станцию и внешний терминал. Существуют следующие типы подвижных станций:

-МТО (*Mobile Termination tape 0*) – полностью интегрированная подвижная станция, не имеющая интерфейса с внешними устройствами. К этому типу относятся как простейшие подвижные станции, которые совсем не поддерживают передачу данных, так и чрезвычайно сложные коммуникационные устройства, объединяющие в себе терминал данных, факс, а также служит для передачи речи;

-MT2 – подвижная станция с последовательным интерфейсом V.24/RS-232, т.е. TAF-блок интегрирован с подвижной станцией;

- MT1 – подвижная станция, оборудованная ISDN 64 кбит/с S-интерфейсом. Для того, чтобы соединить стандартный терминал с интерфейсом модема (V.24), требуется специальный терминальный адаптер.

Передача данных может быть *прозрачной* или *непрозрачной*. Передача является *прозрачной*, если при соединении между терминальным оборудованием, подвижной станцией и IWF-блоком на другом конце системы GSM не выполняются никакие процедуры автоматического повтора передачи ошибочных, либо потерянных кадров или пакетов. В результате скорость передачи данных и задержка передачи остаются постоянными, а количество ошибок может меняться.

Передача считается *непрозрачной*, если при соединении между абонентским терминалом и IWF-блоком используется протокол с защитой от ошибок. В системе GSM терминал, подвижная станция или TAF-блок реализуют так называемый *Radio Link Protocol (RLP – протокол радиоканала)*. В основе этого протокола лежит технология ARQ. Она позволяет достичь высокой надежности передачи данных, однако скорость передачи потока данных и задержка становятся переменными. Скорость передачи данных существенно снижается во время передачи соединения в другую соту из-за необходимости повтора кадров, которые были потеряны при смене обслуживающей базовой станции.

3.5.1 Передача данных через сети GSM и PSTN

На рисунке 3.4 изображен канал передачи данных между абонентом GSM пользователем сети PSTN или хостом (сервером), соединенным с внешним миром через сеть PSTN. Хотя в настоящее время PSTN имеет все чаще цифровую реализацию, в момент установления соединения свойства канала PSTN оказываются еще неизвестными. Поэтому сеть GSM использует аналоговый модем IWF-блока для связи с удаленным оборудованием DTE (сервером или компьютером абонента), соединенным с сетью PSTN также через модем.

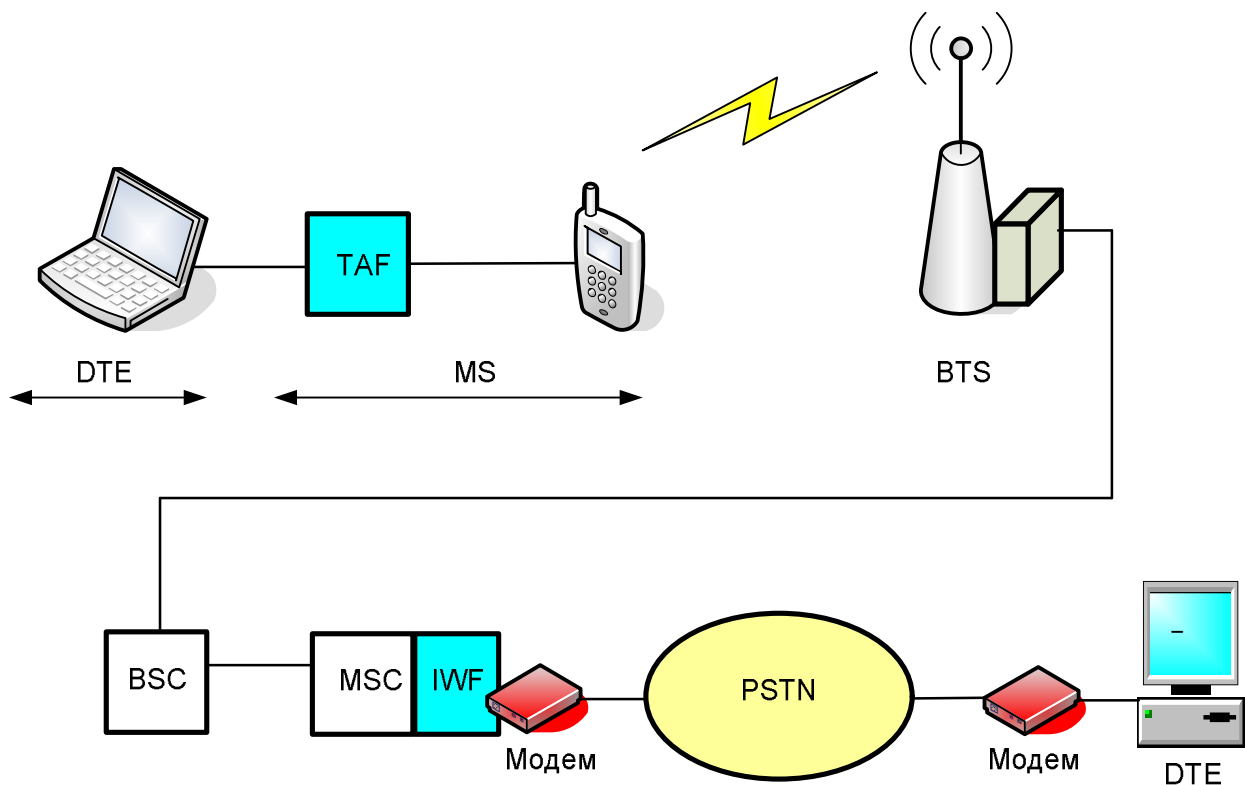


Рисунок 3. 4 – Передача данных через сети GSM и PSTN

Модем IWF-блока генерирует ИКМ – отсчеты аналогового сигнала. Таким образом, сигнал модема становится сигналом, представленным, как и другие сигналы в сети PSTN, в цифровой форме.

3.5.2 Передача данных через сети GSM и ISDN

В данном случае канал полностью цифровой, поэтому аналоговые модемы не нужны. Вместо них используются блоки адаптации скорости, чтобы привести в соответствие скорость передачи данных терминала, присоединенного к сети GSM, со скоростью передачи данных в сети ISDN (рисунок 3.5).

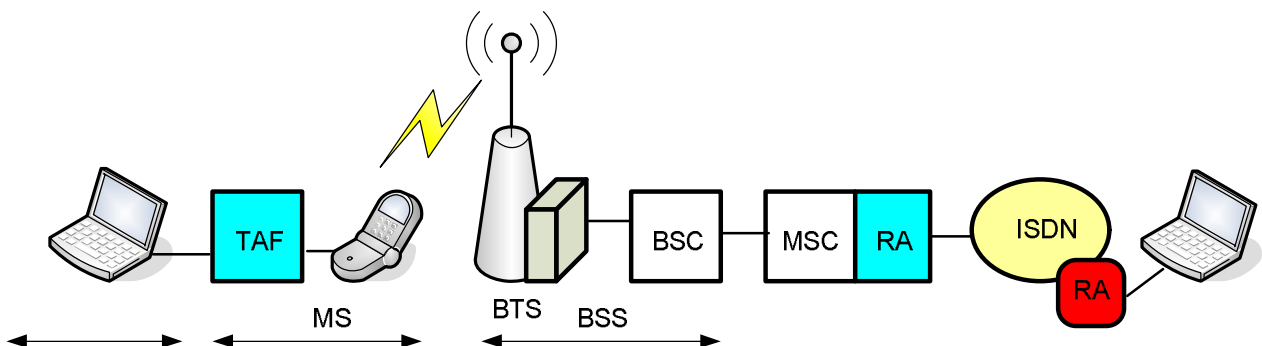


Рисунок 3.5 – Передача данных через сети GSM и ISDN

3.5.3 Взаимодействие сетей GSM и PSPDN

Взаимодействие сетей GSM и PSPDN более сложное. Абонент сети GSM может установить соединение с сетью с коммутацией пакетов через промежуточную сеть PSTN или напрямую. Если в качестве промежуточной сети выступает сеть PSTN, то необходимо использовать аналоговые модемы IWF, а также на стыке сетей PSTN и PSPDN. На рисунке 3.6 изображено прямое соединение сетей GSM и PSPDN.

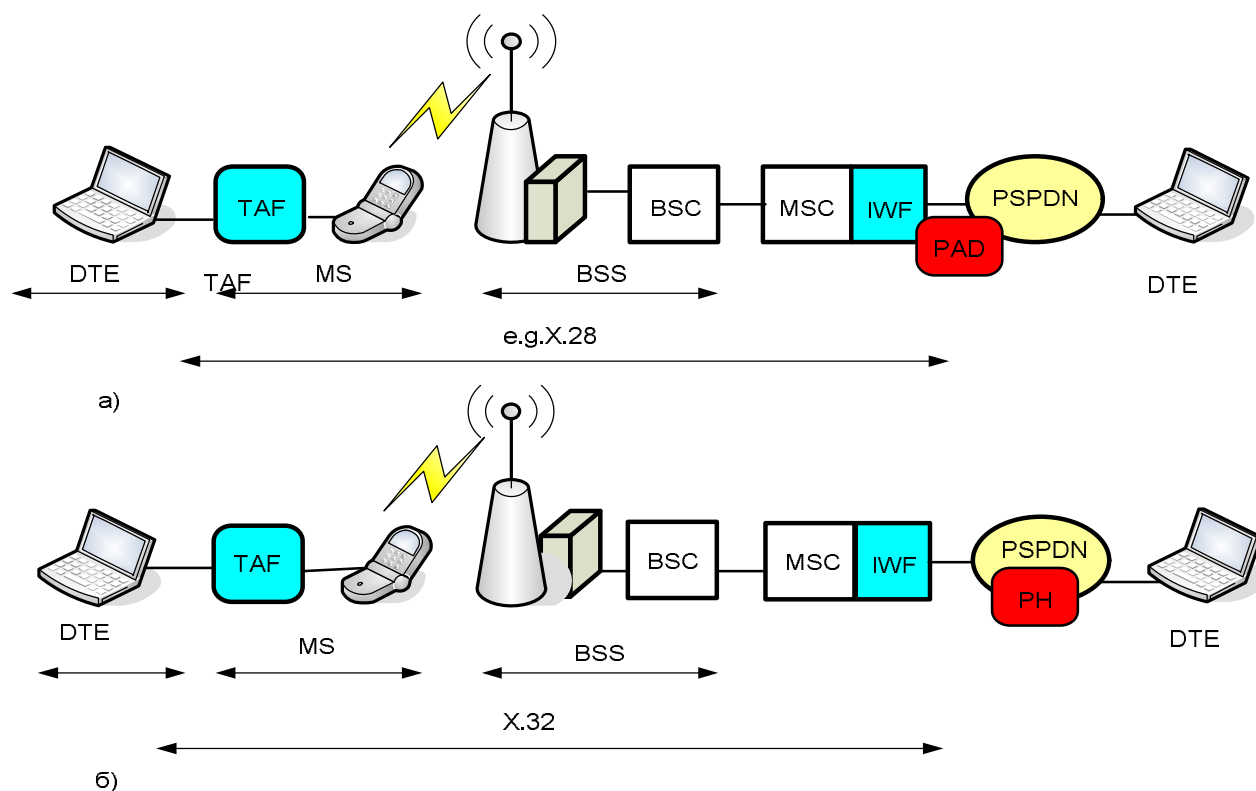


Рисунок 3.6 – Передача данных через сети GSM и PSPDN:
а) при помощи PAD-блока, б) при помощи PH-блока

Здесь модемы не нужны. Доступ к сети PSPDN может быть осуществлен при помощи блока сборки/разборки пакетов (*Packet Assembler /Disassembler - PAD*) или же блока управления пакетами (*Packet Handler - PH*), принадлежащего сети PSDN. Тип используемого блока зависит от протокола, поддерживаемого терминалом мобильного абонента (DTE + MS). Если возможна передача данных с мобильного терминала в соответствии с пакетным протоколом X.32, то используется блок PH. Если подвижный терминал не поддерживает данный протокол, то используется блок PAD.

Стандарты GSM нормализуют правила взаимодействия канала передачи данных с сетями общего пользования с коммутацией каналов (*Circuit-Switched Public Data Network- CSPDN*), а также правила передачи факсов.

3.6 Технологии передачи информации в сетях сотовой связи

Система сотовой связи представляет собой совокупность нескольких взаимодействующих между собой элементов. Для нормального функционирования системы все элементы должны быть связаны между собой для передачи сигнальной информации и полезной нагрузки, т.е. абонентского трафика. При этом очень важно выбрать подходящий способ передачи информации между сетевыми элементами. Необходимо учитывать не только объемы передаваемых данных, но и требуемую надежность канала связи, удаленность объектов. Также необходимо учитывать экономическую эффективность и возможность наращивания пропускной способности в будущем. Если к тому же учесть все многообразие производителей телекоммуникационного оборудования, то задача выбора технологии передачи данных становится действительно сложной задачей. Однако в любом случае существуют некоторые типовые решения по выбору протоколов передачи информации и каналообразующего оборудования. Ниже перечислены наиболее часто используемые протоколы и технологии, используемые при передаче информации между сетевыми элементами в сотовых системах связи:

- IP - Internet Protocol;
- Frame Relay;
- Ethernet;
- ATM - Asynchronous Transfer Mode;
- PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy;
- SDH - Synchronous Digital Hierarchy;
- Fiber optic (оптическое волокно);
- Радиорелейные линии связи.

Большинство существующих каналов связи строится именно на основе перечисленных выше технологий и стеков протоколов. Причем, необходимо отметить, что сотовые системы связи – это одна из самых быстроразвивающихся отраслей телекоммуникаций, в которой используются наиболее современные технологии и разработки. Большинство из новинок в области передачи информации появляются впервые именно в системах сотовой связи. Также отличительной чертой является то, что компании сотовой связи приобретают разнотипное оборудование, различных производителей. Это обусловлено, главным образом, большим разнообразием различных вариантов расположения оборудования. Поэтому практически любая сеть сотовой связи представляет собой "выставку" технологий передачи и, изучив используемые способы передачи лишь одного оператора, можно ознакомиться со всеми основными применяемыми в телекоммуникациях решениями. Более подробную информацию по данному вопросу можно найти в [8].

3.7 Направления развития технологий передачи данных в сетях GSM

Существующий стандарт GSM обеспечивает услуги по прозрачной (transparent) и непрозрачной (nontransparent) передаче данных со скоростью до 9,6 Кбит/с и вероятностью ошибки (Bit Error Rate, BER) меньше 10^{-2} и 10^{-8} соответственно. Любое дальнейшее развитие каналов передачи данных может, в принципе, идти по тому же пути, что и развитие речевых каналов, т. е. по пути улучшения качества передаваемой информации (уменьшение вероятности ошибки), увеличения емкости систем и размера сот. Однако в случае передачи данных увеличение емкости в первую очередь подразумевает повышение эффективности использования малоемких радиоканалов.

Как следует из вышеизложенного, существует несколько различных подходов к повышению скорости передачи данных, разработанных Комитетом SMG в рамках этапа 2+ развития GSM: передача данных по коммутируемым каналам (HSCSD), пакетная передача данных (GPRS), (EDGE) - Enhanced Data rates for Global Evolution.

Повышенная скорость передачи данных при EDGE - заключительная ступень на пути к UMTS (рисунок 3.7).

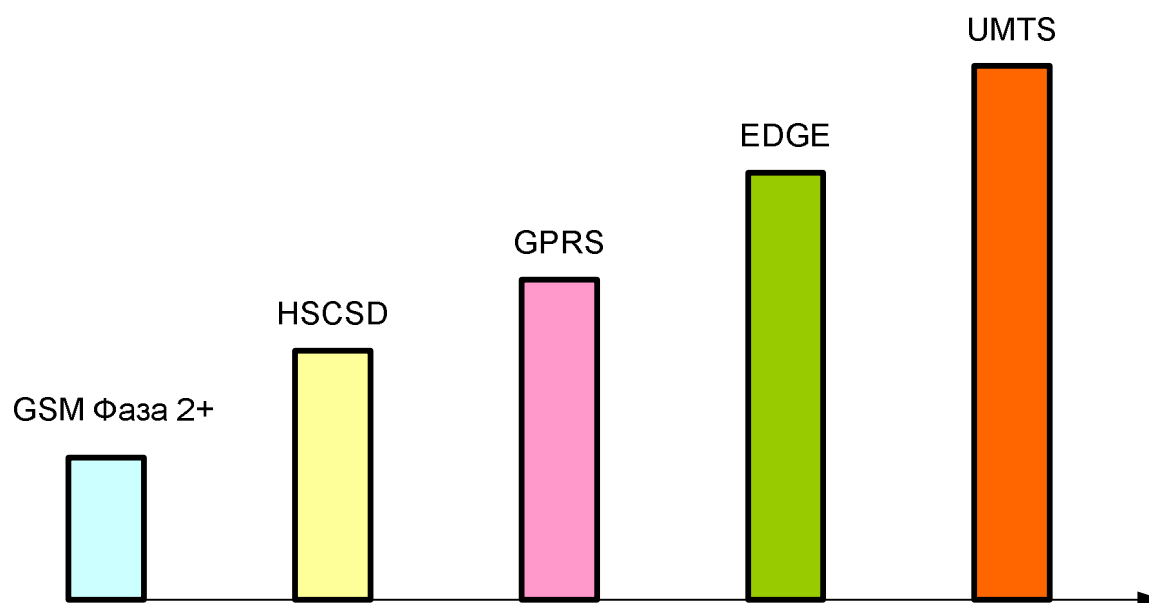


Рисунок 3.7 - Стадии перехода систем GSM к UMTS

3.8 Технология передачи данных HSCSD

Технология HSCSD основана на выделении нескольких полноскоростных каналов (TCH/F) одному HSCSD – соединению. На рисунке 3.8 приведена архитектура системы HSCSD [30].

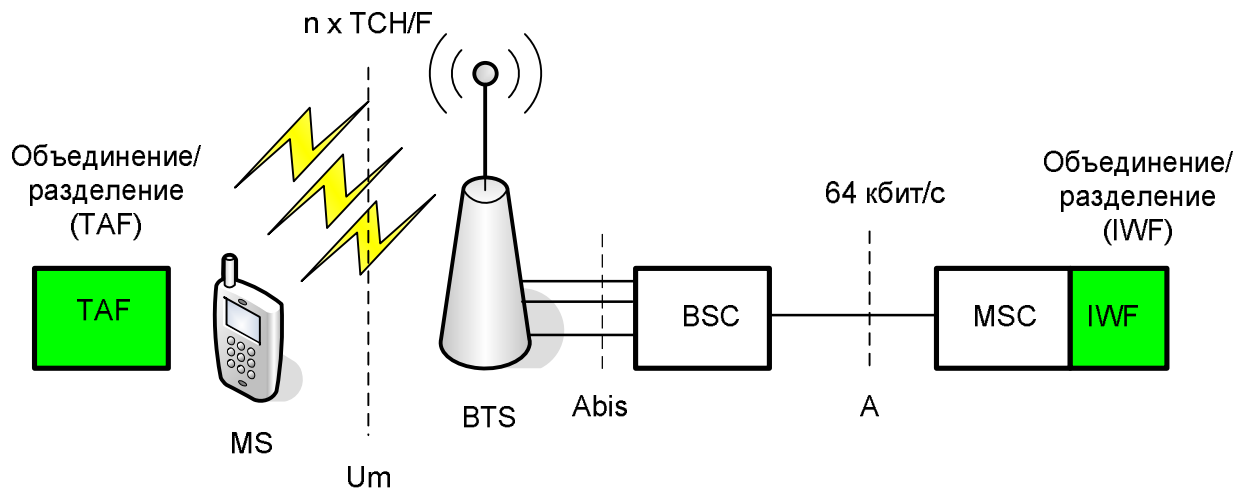


Рисунок 3.8 – Архитектура системы HSCSD

Теоретически, если все восемь временных слотов будут выделены одному соединению, то при использовании полноскоростного канала TCH/9,6 со скоростью передачи данных, равной 9,6 кбит/с, можно получить скорость передачи пользовательских данных, равную $8 \times 9,6 = 76,8$ кбит/с.

На практике максимальная скорость 57,6 кбит/с достигается при выделении одному соединению четырех временных слотов каналов TCH/14,4. Стандартная скорость передачи данных составляет $38,4 = 4 \times 9,6$ кбит/с при использовании четырех каналов TCH/9,6 (*Напомним, что временной слот и канальный интервал (канал) – суть одно и то же.*) Все используемые каналы подвергаются одной и той же процедуре скачкообразной перестройки частоты, имеют одну и ту же обучающую последовательность. К ним применяется одинаковое канальное кодирование, перемежение и процедуры адаптации скорости. Однако, у каждого канала имеется свой собственный ключ шифрования, определяемый на основании одного и того же ключа K_c , хранящегося в SIM – карте.

Каждому составному каналу выделяется медленный ассоциированный канал управления (SACCH). Каждое HSCSD соединение использует один быстрый ассоциированный канал управления (FACCH), который называется главным подканалом HSCSD.

При реализации технологии HSCSD модернизации подлежат, в основном, TAF-блок мобильной части системы и IWF-блок в MSC. Оба блока выполняют объединение и разделение n составных потоков данных ($n = 1, 2, \dots, 8$), передаваемых по различным каналам трафика. Необходимо также несколько модифицировать подсистему базовых станций BSS для совместной обработки нескольких каналов трафика, участвующих в одном HSCSD-соединении.

В А-интерфейсе составные потоки данных должны быть мультиплексированы в один 64 кбит/с канал (рисунок 3.9).

При установлении HSCSD – соединения подвижная станция абонента указывает максимальное (*Desired Number of Channels – DNC*) и минимальное (*Required Number of Channels – RNC*) количество каналов трафика, необходимое для реализации выбранной услуги.

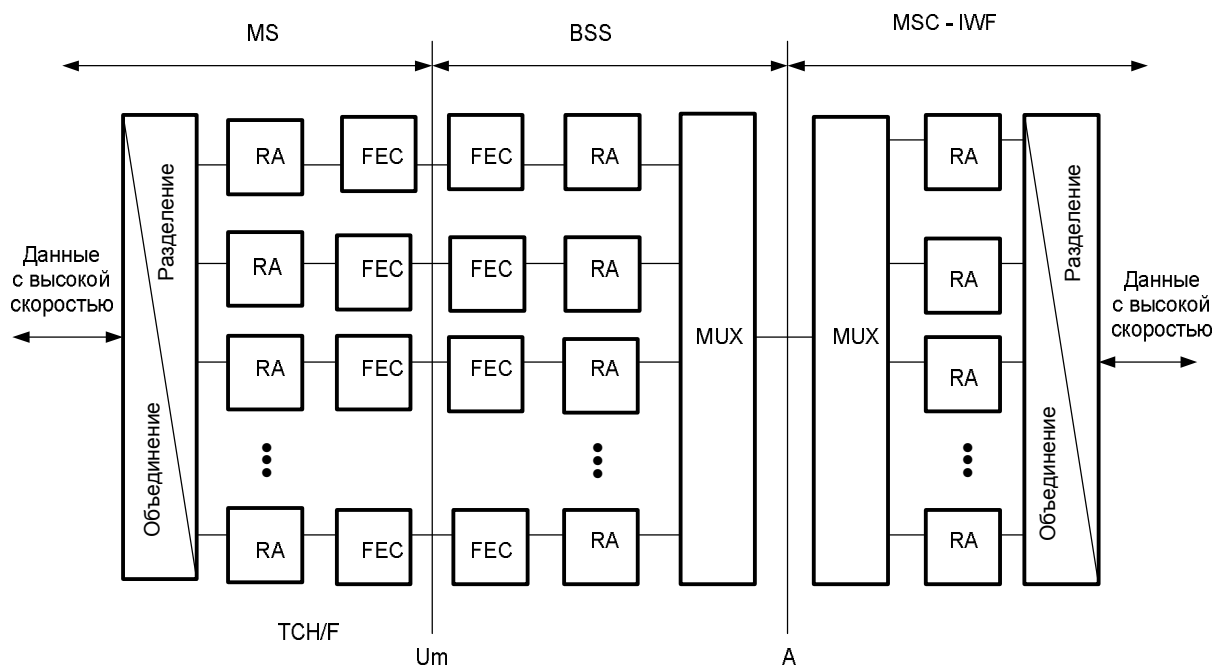


Рисунок 3.9 – Процессы разделения и объединения каналов при передаче данных HSCSD

Она также указывает приемлемое канальное кодирование, тип удаленного модема и значения скорости передачи данных по радиоинтерфейсу пользователя. Абонент может менять свои требования во время передачи данных, если такая возможность была оговорена при установлении соединения. Все выбранные параметры передачи формируют характеристику HSCSD, которая используется сетью для выделения ресурсов HSCSD-соединению.

Услуга HSCSD позволяет устанавливать как прозрачные, так и не прозрачные соединения. Соединение может иметь симметричную или асимметричную конфигурацию. При соединении с симметричной конфигурацией нисходящей и восходящей линиям связи выделяется равное количество каналов. При соединении с асимметричной конфигурацией нисходящей линии связи выделяется большее количество каналов, чем восходящей. Асимметричная конфигурация применяется, если требования абонента не могут быть удовлетворены симметричной конфигурацией. В первую очередь, сеть пытается выполнить требования, связанные со скоростью передачи данных в нисходящей линии связи.

В прозрачных HSCSD-услугах передачи данных используются протоколы X.30/V.110, которые реализуют трехуровневую адаптацию к пользовательскому

интерфейсу. Статус линий модема V.24 от блока GMSC-IWF одинаков для нескольких каналов трафика, поэтому он передается только по одному из них. Освободившиеся биты используются для нумерации каналов во избежание возможных проблем с временным сдвигом каналов трафика.

В основе непрозрачной HSCSD – услуги передачи данных лежит протокол RLP. Для того чтобы RLP-блок мог поддерживать до восьми каналов передачи данных, в него необходимо внести небольшие изменения [1]. В таблице 3.2 показано соответствие скорости передачи пользовательских данных по радиointерфейсу количеству каналов трафика (TCH/F) при предоставлении непрозрачных услуг [30].

Таблица 3.2 – Предоставление скорости передачи данных по абонентскому радиointерфейсу в каналах трафика при непрозрачной передаче

Скорость передачи данных по абонентскому радиointерфейсу, кбит/с	TCH/F4,8	TCH/F9,6	TCH/F14.4
4,8	1	н/д	н/д
9,6	2	1	н/д
14,4	3	н/д	1
19,2	4	2	н/д
28,8	н/д	3	2
38,4	н/д	4	н/д
41,2	н/д	н/д	3
57,6	н/д	н/д	4

Примечание: н/д – нет данных.

HSCSD является первой попыткой расширить возможности системы GSM, связанные с передачей данных. Так как речь шла о незначительной модификации базовой системы, то в системе HSCSD сохранялась коммутация каналов, как и в стандартной версии GSM. Поэтому она не очень хорошо подходит для пакетного трафика, характерного для передачи данных. Резервирование более одного временного слота на всю сессию обмена данными (если не были выделены динамические ресурсы системы) увеличивает вероятность блокирования в соте. Стоимость услуги HSCSD определяется количеством использованных каналов и продолжительностью сессии.

3.9 Технология передачи данных GPRS

3.9.1 Общие сведения

GPRS (General Packet Radio Service – услуга пакетной передачи данных общего пользования) – сервис передачи пакетных данных, предоставляемый в сетях стандарта GSM. Изначально сети стандарта GSM предусматривали пакетную передачу данных по коммутируемым соединениям. Этот сервис назывался CSD (Circuit Switched Data). Максимально возможная скорость передачи данных для CSD составляла не более 9,6 кбит/сек. Такой скорости было достаточно для реализации услуги передачи факсов (низкого разрешения) и небольших объемов данных. При этом, данные передавались через всю сеть базовых станций (BSS), а далее через центральный коммутатор (MSC) направлялись к внешним сетям передачи данных.

С ростом интереса к услуге передачи данных через сотовые системы связи технология CSD была усовершенствована, и в сетях сотовой связи началось применение технологии HSCSD (High Speed Circuit Switch Data – высокоскоростная передача данных по коммутируемым соединениям). Максимальная скорость передачи данных была увеличена до 57,6 кбит/сек (раздел 3.8). Это позволяло передавать файлы больших размеров (сотни килобайт) и факсы высокого разрешения. Увеличение максимальной скорости в первую очередь было достигнуто за счет использования одновременно нескольких таймслотов (TS) на радиоинтерфейсе между мобильной станцией (MS) и базовой станцией (BTS). В сервисах CSD и HSCSD тарификация осуществлялась по времени затраченному на передачу данных. Таких возможностей в 90-е годы прошлого столетия было вполне достаточно.

Однако с широким распространением сети Интернет скоростей передачи данных, предоставляемых коммутируемыми соединениями, стало заметно не хватать. На загрузку одной страницы с помощью технологии HSCSD могло уйти несколько минут что ни как не могло устроить абонентов. В свою очередь технология передачи данных по коммутируемым соединениям имеет существенный недостаток – необходимость устанавливать соединение на все время сессии абонента, а как показывает практика, занятия этого канала иногда составляет менее 50%. Таким образом, сервисы CSD и HSCSD не позволяют эффективно использовать ценные радиоресурсы. Решением этой проблемы может служить пакетный способ передачи данных. При этом для всех абонентов, которым необходима услуга передачи данных, предоставляется общий ресурс в соте, который используется ими по необходимости и именно тогда, когда они передают данные, а в моменты простоя этот ресурс используется другими абонентами. В таком случае увеличивается вероятность перегрузок, однако с другой стороны этот способ распределения ресурсов значительно более экономичный.

Первой технологией передачи данных в системах сотовой связи с пакетной коммутацией стала GPRS. Эта технология позволяет достигать скорости передачи данных до 171 кбит/сек, чего уже достаточно для просмотра средних

интернет - страниц и обмена небольшими файлами (сотни килобайт - мегабайт) в сети. GPRS в отличие от передачи данных по коммутируемым соединениям предусматривает установку нескольких новых устройств и модернизацию (программную и аппаратную) некоторых существующих элементов сети GSM (рисунок 3.10) [30].

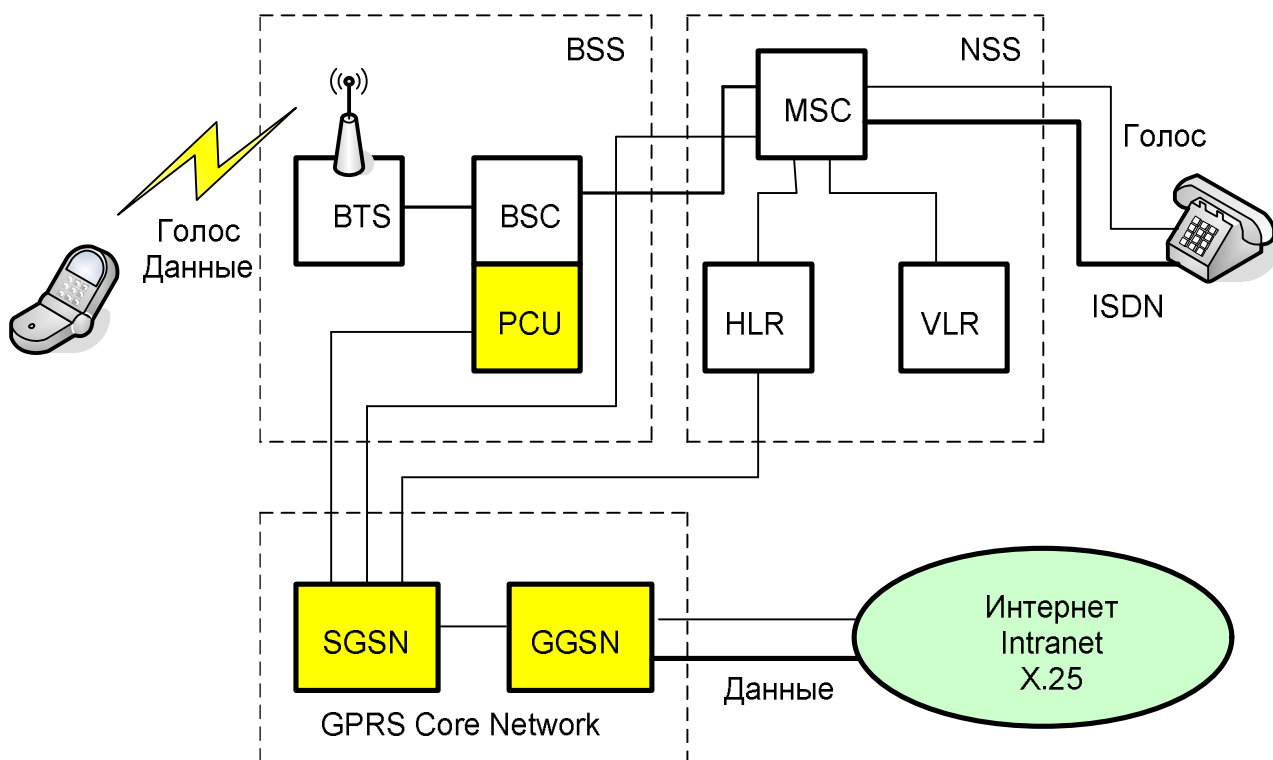


Рисунок 3.10 – Модернизация сети GSM при введении технологии GPRS

В первую очередь для сети GPRS необходима установка двух новых элементов: SGSN (Serving GPRS Support Node - узел обслуживания абонентов GPRS) и GGSN (GPRS Gateway Service Node - шлюзовой узел GPRS). Они образуют так называемый пакетный домен или пакетную сеть сети стандарта GSM. SGSN выполняет ту же роль, что и MSC для голосовой сети. В его задачи входит маршрутизация пакетов, установление и отключение интернет-сессий, выставление счетов за оказанные услуги связи. В свою очередь GGSN соответствует G-MSC голосовой сети. Его главной задачей является маршрутизация пакетов между внутренней сетью и внешними сетями передачи данных (сети других операторов сотовой связи, Интернет и т.п.)

Кроме того, для внедрения услуги GPRS необходима модернизация контроллера базовых станций (BSC). В частности необходима установка нового функционального блока, отвечающего за обработку сигнализации и маршрутизацию пакетов. Также необходима модернизация программного обеспечения других блоков BSC. Базовые станции BTS и MSC требуют меньших изменений,

но все же и для них необходима модернизация программного обеспечения. Кроме всего прочего, необходимо создание интерфейсов между новыми элементами сети: SGSN и GGSN и существующими: BSC, MSC, VLR, HLR.

Для получения услуг GPRS необходимы изменения в мобильной станции. Все MS, которые могут пользоваться технологией GPRS, разделены на 3 класса. Так, аппараты класса А могут одновременно работать в сети GSM и работать по технологии GPRS. MS класса В работают или в сети GSM или в GPRS, но соединение во второй технологии не разрушается, а удерживается. Терминалы С-класса могут работать только в одной из технологий.

Выведение услуги GPRS фактически приводит к появлению сети, параллельной сети GSM. *Новая система использует множество ресурсов GSM, однако основные сетевые элементы соединены друг с другом при помощи отдельной опорной сети, в основе которой лежит протокол IP. На рисунке 3.11 изображена обобщенная архитектура системы GPRS.* Рассмотрим назначение элементов сети более подробно.

Главными элементами сети GPRS являются *узлы поддержки GPRS (GPRS Support Nodes - GSN)*. Они обеспечивают доставку пакетов данных и определяют их маршрут между подвижной станцией и внешними сетями с коммутацией пакетов.

Узел текущей поддержки GPRS (*Serving GPRS Support Node - SGSN*) отвечает за доставку и получение пакетов в своей зоне обслуживания. Он работает таким же образом, как и центр коммутации подвижной связи в обычной системе GSM. SGSN определяет маршрут передаваемых пакетов и пересылает их на соответствующие узлы. Кроме того, он контролирует перемещение подвижной станции и отвечает за управление логическими каналами. SGSN обеспечивает аутентификацию подвижной станции и сохраняет информацию об абонентах услуги GPRS, зарегистрированных в данном SGSN в регистре местоположения. Эта информация включает в себя индекс текущей соты, текущий регистр VLR, а также профиль абонента, включающий в себя международный идентификационный номер (IMSI) и адрес абонента в сети с коммутацией пакетов.

Узел шлюзовой поддержки GPRS (GPRS Support Node – GGSN) обеспечивает интерфейс между опорной сетью GPRS и внешними сетями с коммутацией пакетов. Этот узел преобразует GPRS – пакеты в соответствующий формат протокола пакетных данных (Packet Data Protocol – PDP), зависящего от типа назначения этого пакета. После преобразования пакеты передаются в сеть назначения. Обработка входящих из внешних сетей пакетов заключается в преобразовании адреса из формата PDP в формат GSM и передаче обработанных пакетов на соответствующий узел SGSN.

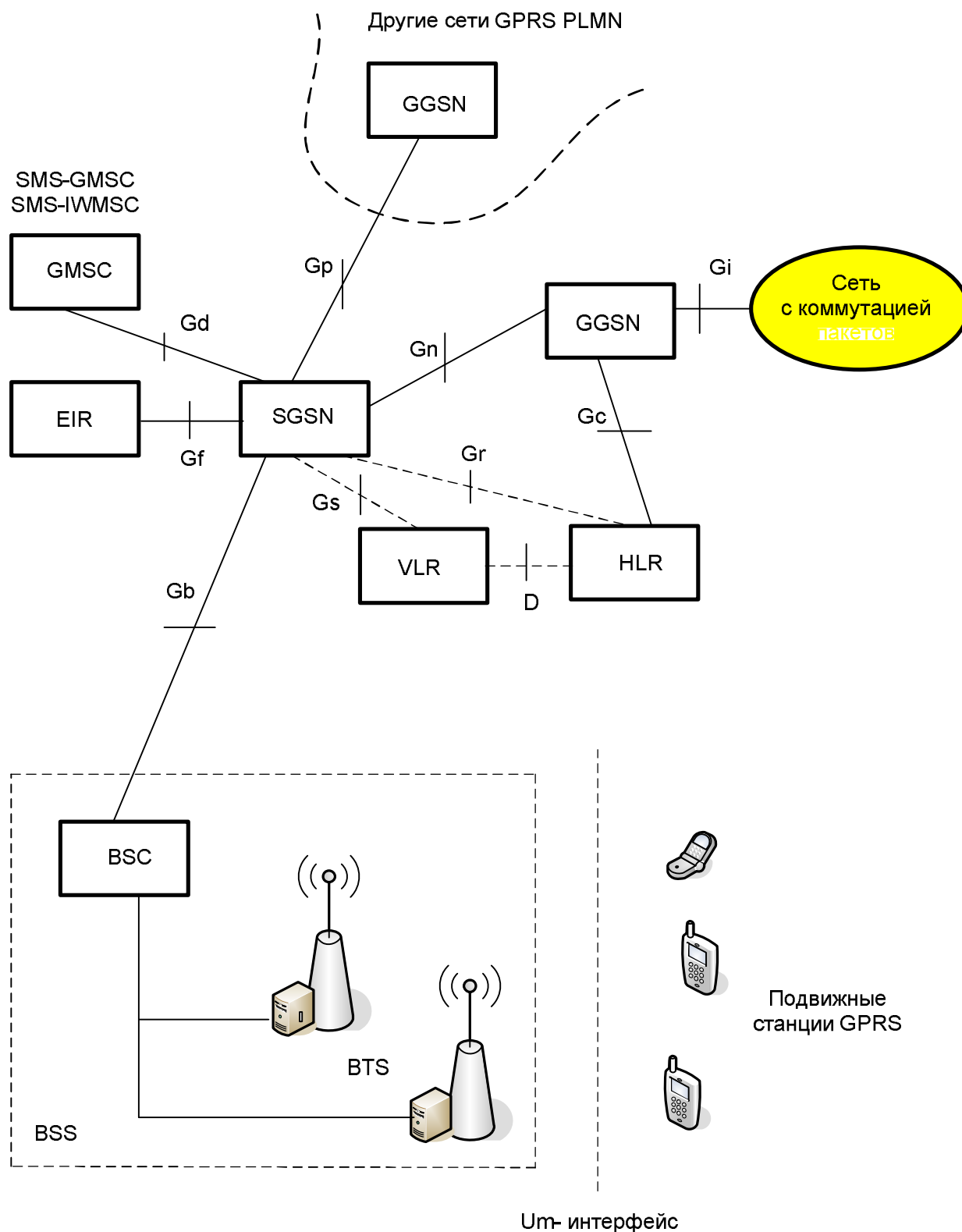


Рисунок 3.11 – Обобщенная структура сети GPRS

Для этого узел SGSN запрашивает из своего регистра местоположения сохраненный профиль абонента и обслуживающий его текущий узел SGSN. Система GPRS обеспечивает взаимодействие с несколькими типами внешних сетей с коммутацией пакетов, поэтому существует несколько различных узлов SGSN.

В регистре HLR хранятся данные обо всех GPRS-соединениях, зарегистрированных в своей системе GSM. Они включают в себя профиль пользователя и его текущие SGSN и PDP адреса.

Регистр VLR, объединенный с MSC (MSC/VLR), выполняет большее количество функций, чем в стандартной системе GSM. Он позволяет осуществлять взаимодействие каналов GPRS и обычной сети GSM с коммутацией каналов.

Все блоки системы GPRS связаны с блоками системы GSM соответствующими стандартизированными интерфейсами. Все узлы GPRS соединены опорной сетью с использованием IP – протокола. Передаваемые пакеты конвертируются узлами GSM и передаются в соответствующий сетевой узел при помощи протокола туннелирования GPRS (*GPRS Tunneling - GTP*).

Узлы системы GPRS связаны со своей собственной сетью с помощью внутренней опорной сети (*intra – PLMN backbone network*). Соединение с внешними PLMN – сетями осуществляется при помощи внешней опорной сети (*inter – PLMN backbone network*).

3.9.2 Физический уровень GPRS

Пакетная передача и асимметрия трафика потребовали внесение некоторых изменений и дополнений в физический уровень стандартной GSM – системы. *Прежде всего, система GPRS предусматривает работу в многослововом режиме, в котором одной подвижной станции может быть выделено до восьми временных слотов в кадре.* Асимметричность пакетного трафика приводит к тому, что восходящей и нисходящей линиям связи выделяются различные ресурсы. Выделение канала производится только на время передачи или приема пакета. В промежутках между передачей последовательных пакетов этот канал может использоваться другими подвижными станциями. *Так реализуется правило «емкость по требованию».* Это означает, что количество выделенных физических каналов является функцией интенсивности трафика, приоритета услуг и класса многословового режима работы. Физические каналы могут совместно использоваться системами GSM и GPRS.

Основной физический канал GPRS называется каналом передачи пакетных данных (*Packet Data Channel - PDCH*). В GPRS применяется несколько логических каналов, организация которых показана на рисунке 3.12. Они выполняют следующие функции:

- канал трафика пакетных данных (*Packet Data Traffic Channel - PDCH*) используется для передачи пользовательских данных. Одному GPRS – терминалу может быть выделен один или несколько каналов PDCH;
- широкополосный канал управления (*Packet Broad Control Channel – PBCCCH*) используется базовой станцией для извещения всех подвижных станций своей соты об организации GPRS и GSM;
- общий пакетный канал управления (*Packet Common Control Channel – PCCCH*) включает в себя следующие каналы:
 - пакетный канал случайного доступа (*Packet Random Access Channel –*

PRACH) используется подвижными станциями для запроса одного или более каналов *PDTCH*;

- пакетный канал предоставления доступа (*Packet Access Granted Channel – PAGCH*) используется для передачи подтверждения о выделении подвижной станции одного или более каналов *PDTCH*;
- пакетный вызывной канал (*Packet Paging Channel - PPCH*) используется базовой станцией для вызова требуемой подвижной станции и определения соты, в которой она находится в текущий момент;
- пакетный канал оповещения (*Packet Notification Channel - PNCH*) предназначен для оповещения подвижной станции о наличии многоадресных сообщений или групповых вызовов;

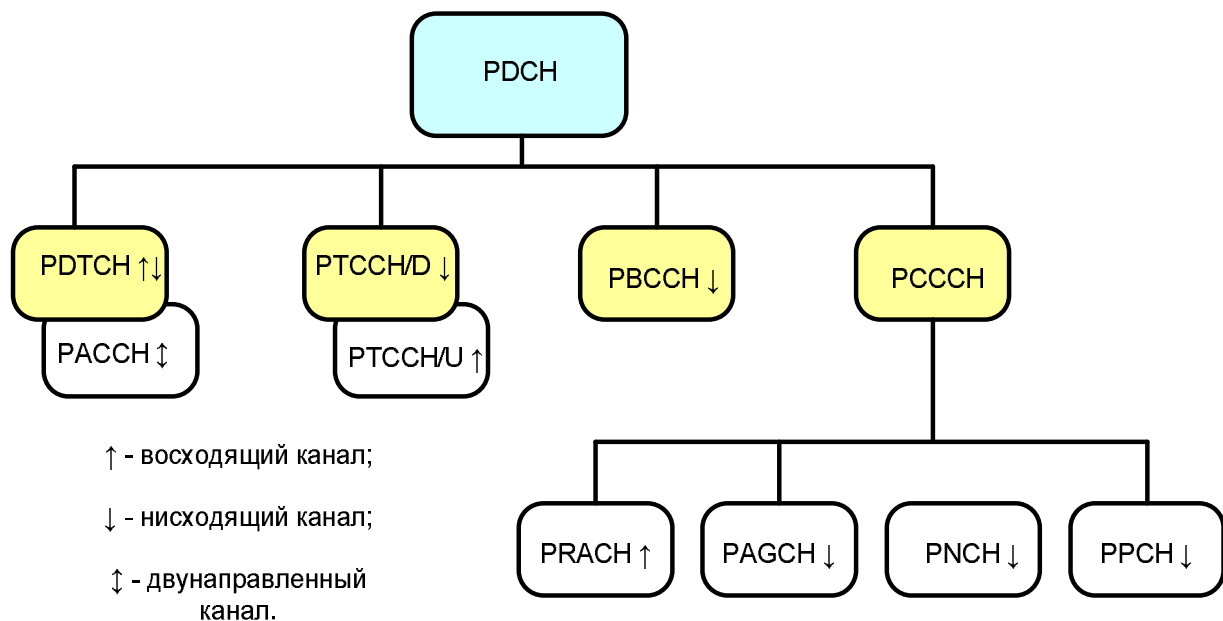


Рисунок 3.12 – Логические каналы в системе GPRS

- пакетный ассоциированный канал управления (*Packet Associated Control Channel - PACCH*) применяется для передачи управляющей информации, связанной с одним или более каналами *PDTCH*, используемых подвижной станцией. Это двунаправленный канал;
- пакетный канал управления переключением режимов прием/передача (*Packet Timing Advance Control Channel – PNCC/U и PTCCH/D*) используется в восходящей (U) и нисходящей (D) линиях связи для настройки временного сдвига кадра, обеспечивая тем самым кадровую синхронизацию.

Используемые в GPRS логические пакетные каналы распределены по физическим каналам физического уровня системы GPRS аналогично тому, как это сделано в стандартной системе GSM. С целью понимания дальнейшего коротко рассмотрим концепцию построения каналов в системе GSM (рисунок 3.13).

Каждый временной интервал (time slot - TS) внутри кадра TDMA называется физическим каналом. В системе GSM используется 8 физических каналов на одной несущей частоте.

Физический канал предназначен для передачи речи, данных или сигнальной информации.

По физическому каналу могут передаваться любые сообщения. Последнее зависит от информации, которую нужно передать. Информация по каналам передается в виде логических сообщений. В соответствии с типами сообщений каналы подразделяются на различные типы логических каналов, то есть в зависимости от типа передаваемого сообщения физическому каналу присваивается определенное наименование. Например, один из физических каналов используется для передачи трафика, то есть трафик передаётся по каналам TCH – Traffic Channel, в виде речевых сообщений - Traffic messages), в то время как хэндоверные команды передаются, используя сообщения канала управления с быстрым доступом Fast Associated Control Channel (FACCH).

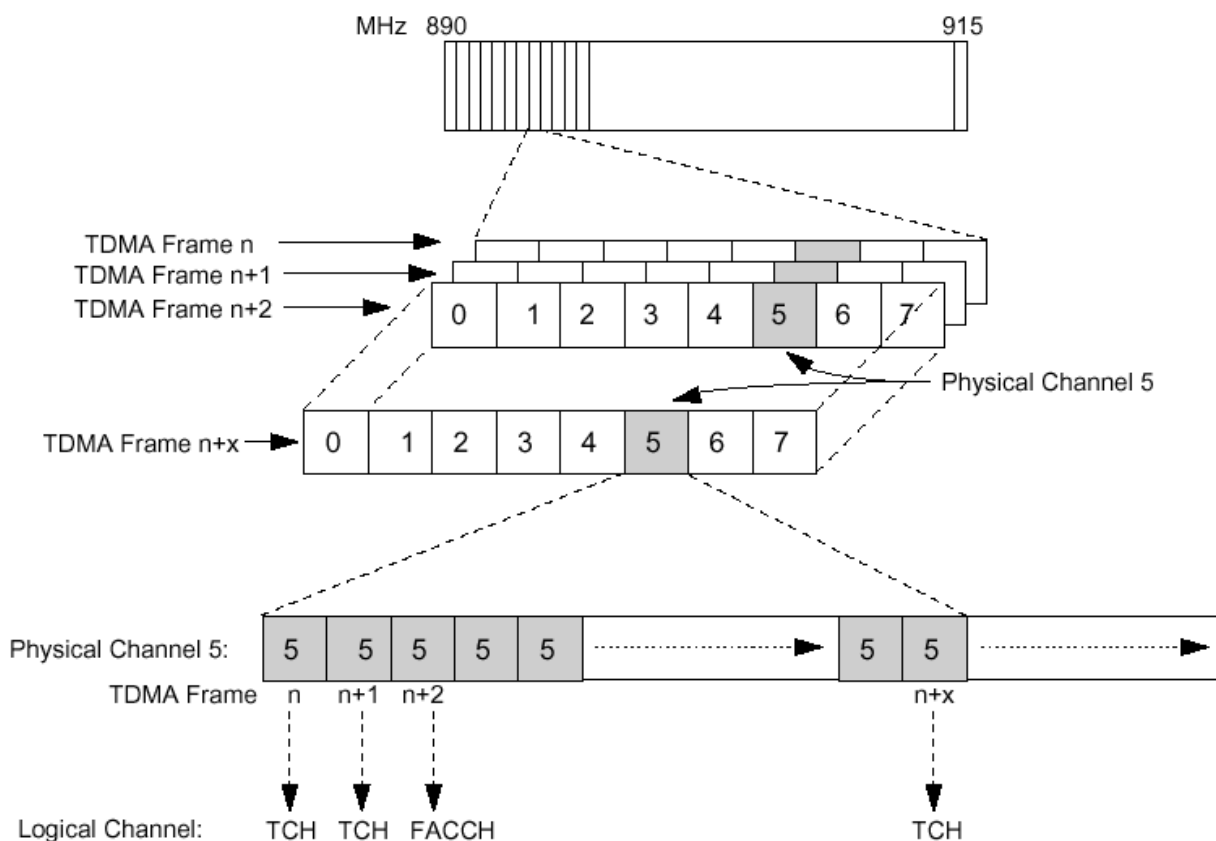


Рисунок 3.13 – Организация каналов в системе GSM

В системе GSM существует большое количество логических каналов, которые разработаны для передачи различной информации к/от MS.

Информация, передаваемая от и к MS должна всегда передаваться корректно, таким образом, чтобы принимающее устройство могло правильно разобрать, что означает каждый переданный бит информации. Как упоминалось

выше, пакет передачи (burst), используемый для передачи трафика, помимо речи передаёт другие вспомогательные данные, такие как тестовая последовательность. Существует несколько типов пакетов (burst). Соотношения между пакетами и логическими каналами показано на рис 3.14.

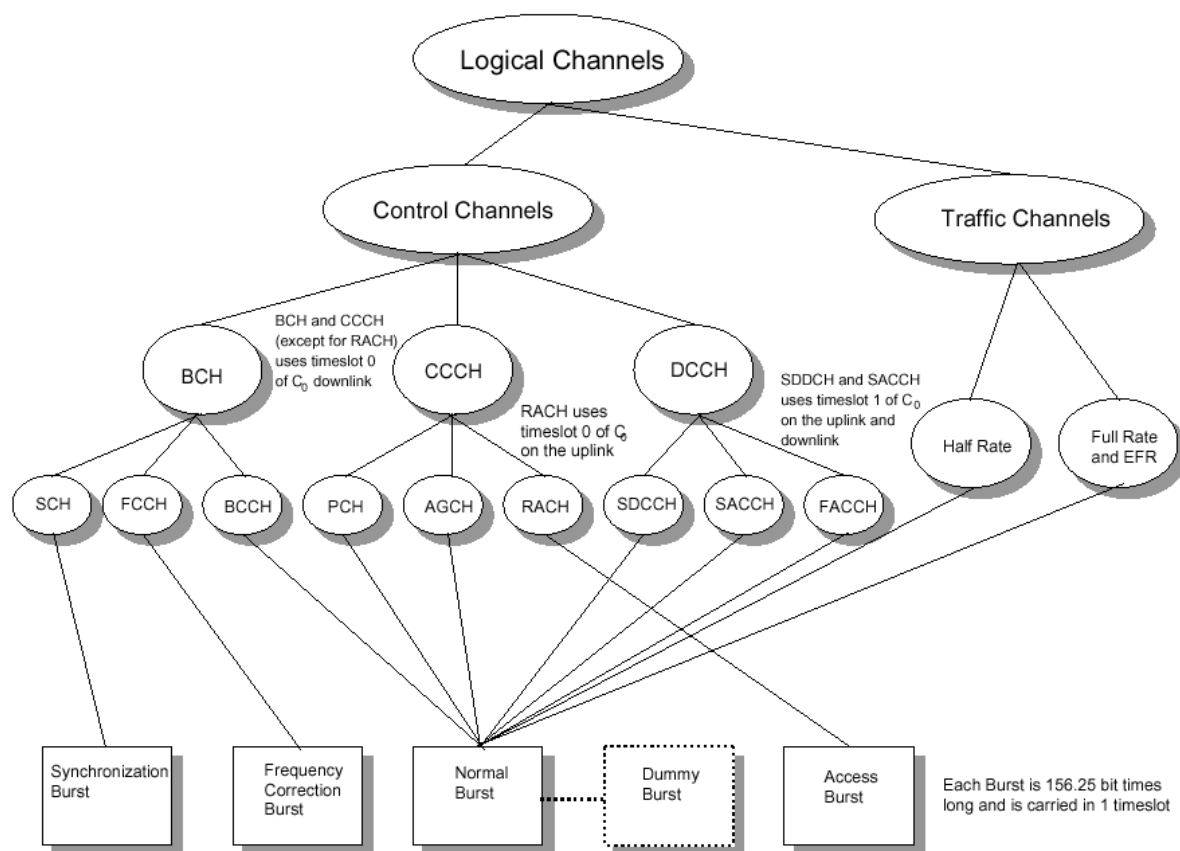


Рисунок 3.14 – Логические каналы и пакеты

Когда мобильная станция включается, она начинает искать BTS, чтобы соединиться с ней. MS сканирует весь частотный диапазон или, в качестве варианта, использует список частот, принадлежащих оператору. Когда MS находит несущую с самым большим уровнем сигнала, она должна определить канал управления. Первый из каналов, который MS должна найти – это широковещательный логический канал Broadcast Control Channel (BCCH) - канал управления с широковещательной передачей.

Несущая частота BCCH содержит важную информацию для MS, включающую, например, идентификатор зоны местоположения (LA), идентификатор сети, информацию о синхронизации. Без такой информации MS не может работать с сетью. Данная информация передается в определенном временном интервале и называется широковещательной информацией, так как предназначена всем MS, способным получить доступ к этой несущей. Именно поэтому канал Broadcast Channel (BCH) называется широковещательным.

После того, как MS закончит анализировать информацию на канале BCH, она будет располагать всей информацией, необходимой для нормального функционирования и работы с сетью. Однако, если MS переходит в другую соту

(этот процесс называется роуминг - roaming), она должна повторить всю процедуру сканирования системы, читая информацию на каналах FCCH, SCH, BCCH.

Если абонент инициализирует вызов с помощью MS, то мобильная станция должна использовать общий канал управления Common Control Channel (CCCH). Информация о канале BCCH приведена в таблицах 3.2 - 3.4.

Таблица 3.2 – Информация о канале BCCH

Broadcast Channel (BCCH) - Широковещательные каналы			
<i>Логический канал</i>	<i>Направление</i>	<i>BTS</i>	<i>MS</i>
FCCH Канал коррекции частоты (Frequency Correction Channel)	Downlink – от BTS к MS, точка-многоточка	<i>Передаёт несущую частоту.</i>	Идентифицирует несущую BCCH посредством несущей частоты и позволяет осуществить синхронизацию с частотой.
SCH Канал синхронизации (Synchronization Channel)	Downlink – от BTS к MS, точка-многоточка	Передаёт информацию о структуре кадра TDMA в соте (номер кадра) и идентификатор BTS (Base Station Identity Code - BSIC).	Позволяет осуществить синхронизацию со структурой кадра внутри конкретной соты для обеспечения гарантии того, что выбранная BTS принадлежит GSM – если BTS принадлежит сети GSM, то декодировать BTSIC может только MS.
BCCH Канал управления с широковещательной передачей (Broadcast Control Channel)	Downlink – от BTS к MS, точка-многоточка	Передаёт всю общую информацию о соте: - идентификатор зоны местоположения (LAI), - максимальную допустимую выходную мощность в соте, - идентификатор несущей BCCH для соседних сот, - информацию о секторах	<i>Принимает LAI; в качестве части процедуры обновления местоположения уведомляет сеть о том, отличается ли LAI от того, который хранится в SIM; устанавливает выходную мощность на основе информации, принятой на BCCH. Кроме того, MS хранит список несущих BCCH, на которых были произведены измерения уровня приема для принятия решения о хэндовере.</i>

Таблица 3.3 – Информация о канале CCCH

Common Control Channel (CCCH)			
<i>Логический канал</i>	<i>Направление</i>	<i>BTS</i>	<i>MS</i>
РСН Канал вызова MS (Paging Channel)	Downlink, от BTS к MS, точка - точка	Передаёт вызывное сообщение, чтобы оповестить MS о входящем вызове или поступлении сообщения SMS. Содержит идентификационный номер абонента, с которым система желает установить связь.	MS прослушивает РСН в определённые временные интервалы и, если обнаруживает собственный номер (номер идентификатора абонента), то она отвечает.
РАСН Канал запроса доступа в сеть (Random Access Channel)	Uplink, от MS к BTS, точка - точка	Принимает запрос от MS для установления соединения, обновления информации о местоположении, передачи SMS.	Отвечает на пэйджинговые сообщения по каналу РАСН путем запроса предоставления канала сигнализации.
АГСН - Канал уведомления о разрешении доступа (Access Grant Channel)	Downlink от BTS к MS, <i>точка - точка</i>	Назначение сигнального канала SDCCH для MS.	<i>Приём команды назначения сигнального канала SDCCH.</i>

На этой стадии MS и BSS готовы выполнить процедуры установления соединения. Для этого MS и BSS используют выделенные каналы управления - DCCH (Dedicated Control channel).

Таблица 3.4 – Информация о каналах DCCH

Common Control Channel (CCCH)			
<i>Логический канал</i>	<i>Направление</i>	<i>BTS</i>	<i>MS</i>
SDCCH Сигнальный канал (Stand alone Dedicated Control Channel)	Оба направления (Uplink, Downlink), точка - точка	BTS переключается на назначенный канал SDCCH, используемый для сигнализации при установлении соединения. С помощью этого канала BSC назначает канал TCH. SDCCH используется также для передачи в направлении MS текстовых сообщений SMS.	MS переключается на выделяемый канал SDCCH, осуществляется процедура установления соединения. MS получает информацию о назначении TCH (несущую и временной интервал)

Таблица 3.4 – Продолжение

СВСН Канал широко- вещательной передачи в соте (Cell Broadcast Channel)	Downlink, от BTS к MS, точка - мно- готочка	Использует данный канал для широко- вещательной передачи текстовых со- общений (SMS) всем MS, находящимся в опреде- ленной соте.	MS принимает широко- вещательные текстовые сообщения
SACCH Канал управления с медленным досту- пом (Slow Associated Control Channel)	Оба направ- ления (Uplink, Downlink), точка - точка	Оповещает MS о том, на какой мощности осуще- ствлять связь, а также пе- редаёт информацию о временной задержке.	Отсылает отчеты об ус- редненных измерениях в обслуживаемую её BTS (уровень сигнала, качест- во, временная задержка) и соседние BTS (уровень сигнала). MS в процессе разговора постоянно ис- пользует SDCCN.
FACCH Канал управления с быстрым доступом (Fast Associated Control Channel)	Оба направ- ления (Uplink, Downlink), точка - точка	Передаёт информацию о хэндовере.	Передаёт необходимую информацию о хэндовере в пакете доступа.

После завершения процедуры установления соединения по физическому каналу управления, MS настраивается на физический канал передачи трафика. Для этого используется логический канал TCH (Traffic Channel). Существует два типа каналов TCH:

- Полноскоростной канал (FR-TCH): передача осуществляется со скоростью 13 кбит/сек. То есть TCH занимает под трафик один физический канал;
- Полускоростной канал (HR-TCH): передача осуществляется со скоростью 6.5 кбит/сек. Два полускоростных канала занимают один физический канал, тем самым увеличивая пропускную способность соты вдвое.

В структуре кадра TDMA для передачи информации по каналам связи и управления, подстройки несущих частот, обеспечения временной синхронизации и доступа к каналу связи используются пять видов пакетов (bursts) (Таблица 3.5).

Нормальный пакет – NB (Normal Burst) NB используется для передачи информации по каналам связи и управления, за исключением канала доступа RACH. Он состоит из 114 бит зашифрованного сообщения и включает защитный интервал (GP) в 8,25 бит длительностью 30,46 мксек.

Информационный блок в 114 бит разделен на два самостоятельных блока по 57 бит, отделенных друг от друга обучающей последовательностью в 26 бит, которая используется для установки эквалайзера в приемнике в соответствии с характеристиками канала связи в данный момент времени.

Таблица 3.5 – Типы пакетов

Тип пакета	Для чего используется	Используется:	Содержит
Normal Burst Нормальный пакет	Используется для передачи информации на каналах трафика и управления	BCCH, PCCH, AGCH, SDCCH, CBCH, SACCH, FACCH, TCH	<ul style="list-style-type: none"> □ Два блока по 57 бит каждый, для передачи трафика. □ Тестовую последовательность (26 бит). □ Индикаторы заимствования (Steal flags) – каждый состоит из 1 бита, указывающего на то, что канал FACCH временно занял 57 бит. □ Хвостовые биты (Tail bits) (всегда 000) □ Защитный период (Guard period) длительность 8.25 бит.
Frequency Correction Burst Пакет подстройки частоты	Используется для частотной синхронизации MS	FCCH	<ul style="list-style-type: none"> □ 142 бита коррекции частоты. □ Хвостовые биты. □ Защитный период: 8.25 бит.
Synchronization Burst Пакет синхронизации	Используется для кадровой синхронизации MS	SCH	<ul style="list-style-type: none"> □ Два блока по 39 бит информации о кадровой структуре TDMA. □ 64 бит синхронизации. □ Хвостовые биты. □ Защитный период: 8.25 бит.
Dummy Burst Установочный пакет «Пустышка»	Используется тогда, когда не передается никакой информации – «пустышка»	Все свободные TS канала C0 (1-7)	<ul style="list-style-type: none"> □ Модель пакета идентична нормальному интервалу, но содержит тестовую последовательность.
Access Burst Пакет доступа	Используется для случайного доступа и для хэндоверов	RACH, FACCH	<ul style="list-style-type: none"> □ 41 бит синхронизации. □ 36 бит информации о доступе (например, набираемый В-номер). □ Хвостовые биты. □ Защитный период (GP): 68.25 бит. Большой GP используется из-за того, что при установке соединения нет информации о временной задержке.

В состав NB включены два контрольных бита (Stealing Flag), которые служат признаком того, какую информацию содержит передаваемая группа: речевую информацию или информацию сигнализации. В последнем случае информационный канал (Traffic Channel) используется для обеспечения сигнализации, то есть «украден» у канала трафика.

Между двумя группами зашифрованных бит в составе NB находится обучающая последовательность из 26 бит, известная в приемнике. С помощью этой последовательности обеспечивается:

- оценка частоты появления ошибок в двоичных разрядах по результатам сравнения принятой и эталонной последовательностей. В процессе сравнения вычисляется параметр RXQUAL, принятый для оценки качества связи. Конечно, речь идет только об оценке связи, а не о точных измерениях, так как проверяется только часть передаваемой информации. Параметр RXQUAL используется при вхождении в связь, при выполнении процедуры хэндовера и при оценке зоны покрытия радиосвязью;

- оценка импульсной характеристики радиоканала на интервале передачи NB для последующей коррекции тракта приема сигнала за счет использования адаптивного эквалайзера в тракте приема;

- определение задержек распространения сигнала между базовой и подвижной станциями для оценки дальности связи. Эта информация необходима для того, чтобы пакеты данных от разных подвижных станций не накладывались при приеме на базовой станции. Поэтому удаленные на большее расстояние подвижные станции должны передавать свои пакеты раньше станций, находящихся в непосредственной близости от базовой станции.

Пакет подстройки частоты – FCB (Frequency Correction Burst) FCB предназначен для синхронизации по частоте подвижной станции. Все 142 бита в этом временном интервале – нулевые, что соответствует немодулированной несущей со сдвигом 1625/24 кГц выше номинального значения частоты несущей. Это необходимо для проверки работы своего передатчика и приемника при небольшом частотном разносе каналов (200 кГц), что составляет около 0,022% от номинального значения полосы частот 900 МГц. FCB содержит защитный интервал 8,25 бит так же, как и нормальный пакет. Повторяющиеся пакеты подстройки частоты (FCB) образуют канал коррекции частоты (FCSH).

Пакет синхронизации – SB (Synchronization Burst) SB используется для синхронизации по времени базовой и подвижной станций. Он состоит из синхропоследовательности длительностью 64 бита, несет информацию о номере кадра TDMA и идентификационный код базовой станции. Этот пакет передается вместе с пакетом подстройки частоты. Повторяющиеся пакеты синхронизации образуют так называемый канал синхронизации (SCH).

Установочный пакет – DB (Dummy Burst) DB обеспечивает установление и тестирование канала связи. По своей структуре DB совпадает с NB (рис. 3.3) и содержит установочную последовательность длиной 26 бит. В DB отсутствуют контрольные биты, и не передается никакой информации. DB лишь информирует о том, что передатчик функционирует.

Пакет доступа – АВ (Access Burst) АВ обеспечивает разрешение доступа подвижной станции к новой базовой станции. АВ передается подвижной станцией при запросе канала сигнализации. Это первый передаваемый подвижной станцией пакет, следовательно, время прохождения сигнала еще не измерено. Поэтому пакет имеет специфическую структуру. Сначала передается концевая комбинация 8 бит, затем – последовательность синхронизации для базовой станции (41 бит), что позволяет базовой станции обеспечить правильный прием последующих 36 зашифрованных бит. Пакет содержит большой защитный интервал (68,25 бит, длительностью 252 мксек.), что обеспечивает (независимо от времени прохождения сигнала) достаточное временное разнесение от пакетов других подвижных станций.

Этот защитный интервал соответствует двойному значению наибольшей задержки сигнала в рамках одной соты и тем самым устанавливает максимально допустимые размеры соты. Особенность стандарта GSM – возможность обеспечения связью подвижных абонентов в сотах с радиусом около 35 км. Время распространения радиосигнала в прямом и обратном направлениях составляет при этом 233,3 мксек.

Рассмотрим размещение логических каналов на физических каналах (рисунок 3.15).

		Time slot							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Carrier Frequency	0	B,C	D	T	T	T	T	T	T
	1	T	T	T	T	T	T	T	T
	2	T	T	T	T	T	T	T	T
	3	D	T	T	T	T	T	T	T

Legend:
 B: BCH
 C: CCCH
 D: DCCH
 T: TCH

Рисунок 3.15 - Размещение логических каналов на физических каналах

Известно, что логические каналы образуются с помощью физических каналов. Метод размещения логических каналов на физических называется «отображением» - *mapping*.

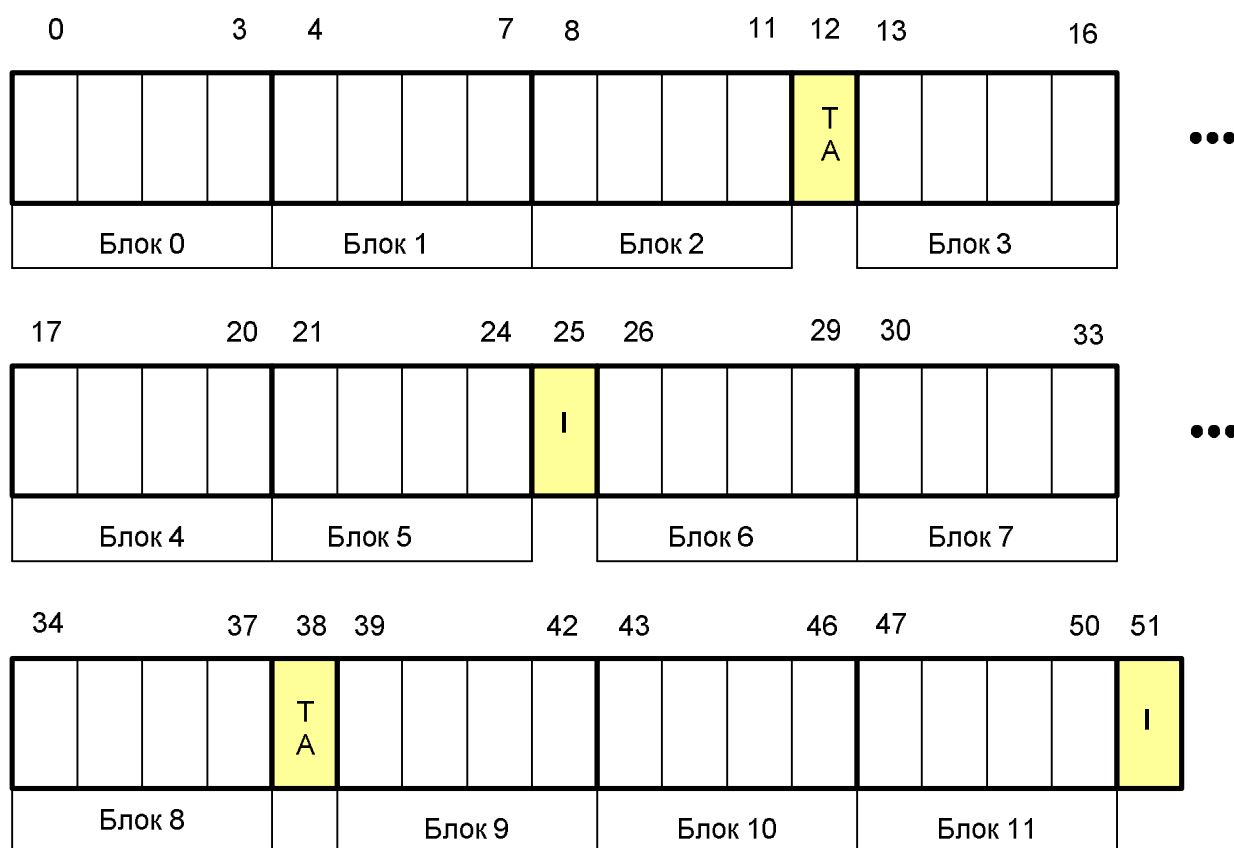
Несмотря на то, что большинство логических каналов занимают только один временной интервал, некоторые логические каналы могут занимать более чем 1 TS. В этом случае информация логических каналов передается в одном и том же временном интервале физического канала в последовательных кадрах TDMA.

Поскольку логические каналы являются короткими, несколько логических каналов могут занимать один и тот же физический канал, что позволяет более эффективно использовать временные интервалы.

На рис. 3.4 показан случай, когда на одной несущей соты каналом DCSN из-за высокой нагрузки занимается дополнительный временной интервал.

Рассмотрим некоторые отличия мультикадров в системе GSM и GPRS.

В системе GSM мультикадр состоит из 26 кадров канала трафика или 51 кадра каналов управления. В GPRS мультикадр состоит из 52 кадров (рисунок 3.13). Четыре последовательных кадра образуют блок. С точки зрения канального кодирования блок становится единым. Мультикадр содержит 12 блоков (B0 – B11). Два кадра не заняты, еще два используются для обновления временного сдвига. В GSM один нормальный пакет переносит 114 бит пользовательских данных. Таким образом, состоящий из четырех кадров блок содержит $4 \times 114 = 456$ бит, и каждая схема кодирования, используемая в GPRS, приводит к появлению 456 –битового потока.



ТА – кадр временного сдвига, I – незанятый кадр

Рисунок 3.13 – Структура мультикадра GPRS

В системе GPRS используется, как правило, двухуровневое канальное кодирование. Внешний код – блочный. К концу кодового слова добавляются несколько конечных битов, после чего оно подвергается сверточному кодированию, а затем перфорированию, чтобы получить кодовое слово длиной 456 бит. В таблице 3.6 приведена основная информация о схемах кодирования, используемых в системе GPRS. *Флаг USF (Uplink State Flag – флаг состояния восхо-*

дящей линии связи) используется в нисходящей линии связи для оповещения подвижной станции о свободном восходящем канале.

Таблица 3.6 – Основные параметры схем кодирования GPRS

Схема	Предварительное кодирование USF, битов	Количество битов RLC - блока	Количество битов CRC	Конечные биты	Количество бит после сверточного кодирования	Количество перфорированных бит	Скорость кодирования	Скорость передачи, на один слот, кбит/с
CS – 1	3	181	40	4	456	0	1/2	9,05
CS -2	6	268	16	4	588	132	2/3	13,4
CS - 3	6	312	16	4	676	220	3/4	15,6
CS - 4	12	428	16	0	456	0	1	21,4

Схемы кодирования CS-1 – CS-4 соответствуют различным условиям. Все четыре схемы используются в пакетных каналах трафика, а схема CS-1 еще и для защиты от ошибок каналов сигнализации (кроме PRACH). Выбор схемы кодирования зависит от состояния радиоканала и требований к услуге. CS-1 – более строгая схема кодирования – используется в каналах с плохими условиями и позволяет передавать данные со скоростью 9,6 кбит/с на временной слот. CS-4, наоборот, применяется в каналах сочень хорошими условиями. В этом случае сверточное кодирование не используется, и скорость передачи данных возрастает до 21,4 на один слот, что позволяет достичь скорости 171,2 кбит/с при выделении одному пользователю всех восьми временных интервалов ($21,4 \times 8 = 171,2$ кбит/с).

Различные схемы кодирования и скорости передачи данных позволяют предоставлять целый набор различных услуг, характеризующихся соответствующим *качеством обслуживания (Quality of Service - QoS)*.

Мобильный абонент может выбирать профиль QoS – профиль, требуемый для проведения каждой новой сессии передачи данных в зависимости от требуемой услуги и доступных в текущий момент сетевых ресурсов.

Достаточно подробную информацию о схемах кодирования GPRS, классах надежности и классах задержки можно найти в [32].

3.10 Технология EDGE

Система GPRS позволяет передавать пакетные данные в режиме коммутации пакетов с использованием более одного временного слота в кадре, если это возможно с точки зрения системных ресурсов. Однако скорость передачи данных не очень высока по сравнению с проводным подключением к сети Internet (до 171 кбит/с). В действительности скорость передачи данных составляет величину порядка 50 - 60 кбит/сек, что достаточно для загрузки несложных Интернет страниц или небольших файлов размером до 1 Мб.

Технология передачи данных для глобальной эволюции EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) позволяет удовлетворить потребности в более высоких скоростях. Первоначально EDGE интерпретировалась как расширение системы GPRS. С точки зрения системы GSM, EDGE – это эволюция систем GPRS и HSCSD в системы *EGPRS (Enhanced GPRS)* и *ECSD (Enhanced Circuit Switched Data)* соответственно.

В настоящее время EDGE для систем с TDMA реализуется в двух вариантах: *EDGE Compact* и *EDGE Classic* [30]. В системе *EDGE Compact* применяется новая структура каналов управления шириной 200 кГц. Базовые станции работают в синхронном режиме, и для реализации системы достаточно полосы частот 1 МГц. Каналы передачи пакетных данных организованы с коэффициентом повторного использования частот, равным 1/3. В системе *EDGE Classic* традиционная структура каналов управления шириной 200 кГц, характерная для GSM. Коэффициент повторного использования несущих частот вещательного канала управления составляет 4/12. Система *EDGE Classic* в минимальной комплектации требует наличия 12 несущих частот или, другими словами, 2,4 МГц с защитными полосами.

В данном разделе рассматривается европейская версия системы EDGE. Внедрение технологии EDGE оказывает влияние лишь на систему базовых станций (BSS), а точнее на сами базовые станции (BTS). Остальные элементы, включая и контроллер базовых станций (BSC), требуют только замены программного обеспечения. Претерпевают изменение приемопередатчики базовых станций и для внедрения EDGE необходима полная их замена.

Для поддержки EDGE аппаратная часть MS также должна быть заменена. Терминалы, поддерживающие EDGE, классифицируют также как и GPRS-терминалы в зависимости от возможности одновременной работы с голосом и данными, а также в зависимости от максимально возможной скорости работы в сети пакетной передачи данных EDGE. Причем, последний параметр определяется двумя составляющими: набором кодовых схем, которые поддерживает терминал и максимальным числом таймслотов, по которым MS может одновременно принимать и передавать данные.

В системе EDGE применяются некоторые усовершенствования, которые позволяют передавать пакеты данных с более высокими скоростями, чем в системах GSM и GPRS (рисунок 3.14). Рассмотрим их более подробно.

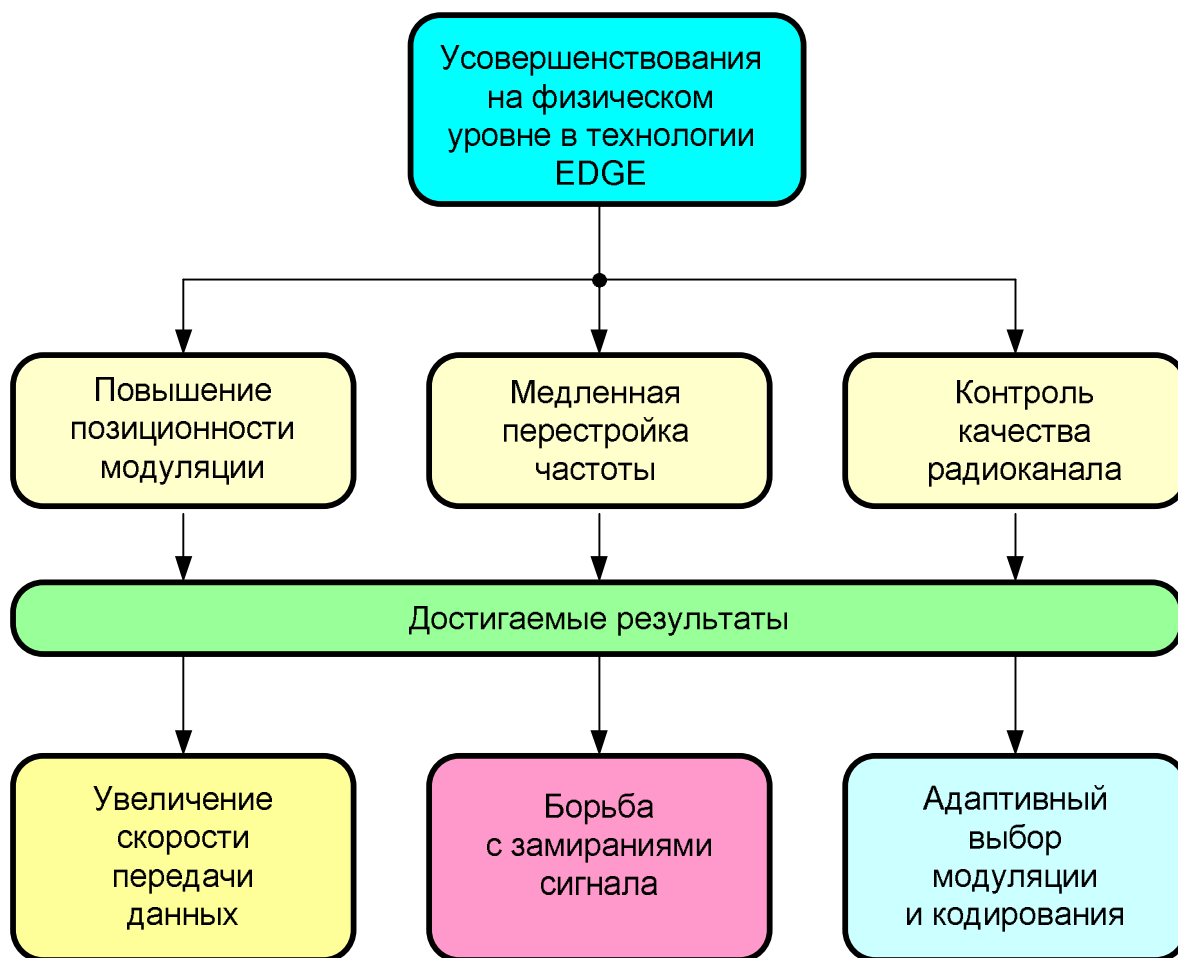


Рисунок 3.14 – Основные усовершенствования на физическом уровне в системе EDGE

Применение в радиоканале восьмипозиционной фазовой модуляции 8-PSK для высокоскоростных режимов работы системы EDGE позволяет обеспечить в три раза большую скорость передачи данных по сравнению со стандартной системой GSM при условии использования той же символьной скорости 270, 33 кбит/с канала с полосой 200 кГц. Подробные сведения о многопозиционных методах модуляции в цифровых системах радиосвязи приведены в [13]. Отметим, что в данном случае один символ переносит 3 бита информации.

С целью приведения ширины спектра модулированного сигнала в соответствие с шириной спектра канала в модуляторе 8 – PSK используется сглаживающий фильтр с соответствующей импульсной характеристикой, подобно тому, как это делается при GMSK – модуляции в системе GSM [13].

Другая особенность системы EDGE – это медленная скачкообразная перестройка частоты, которая представляет собой опцию в стандартной системе GSM. Скачкообразная перестройка частоты несущей позволяет достаточно эффективно бороться с замираниями сигнала. Она также существенно влияет на уровень внутриканальных помех и, следовательно, на суммарную емкость сис-

темы. При использовании скачкообразной перестройки частоты каждый кодовый блок передается на четырех различных несущих.

Следующее важное свойство системы EDGE – контроль качества радиоканала. Подвижные станции передают на базовые станции информацию о качестве канала. На основании этой информации принимается решение о том, какую комбинацию модуляции и канального кодирования следует использовать.

В системе EDGE могут применяться два типа модуляции (GMSK и 8-PSK) и девять скоростей кодирования [13]. Каждая комбинация имеет свою характеристику, выражаемую зависимостью пропускной способности (на один временной слот) от отношения сигнал/шум. Переключение между комбинациями кодирования и модуляции позволяет максимизировать пропускную способность. Принцип адаптации к качеству канала поясняется рисунком 3.15.

Пакет данных в системе EDGE имеет тот же самый формат, что и в системе GSM. Пакет содержит 26-символьную срединную последовательность, три краевых символа в начале и конце пакета и два блока пользовательских данных по 57 символов. Это составляет 348 информационных битов на канальный интервал (временной слот) использования модуляции 8-PSK или 116 бит на слот при использовании GMSK. Мультикадровая структура системы EDGE совпадает со структурой системы GPRS (см. рисунок 3.13). Мультикадр состоит из 52 кадров, в которых размещены 12 блоков данных. Каждый 13-й кадр не несет пользовательской информации и используется для корректировки временного сдвига или проведения измерений. Таким образом, с учетом всех перечисленных факторов, максимальная скорость передачи данных на одну несущую (если используются все временные слоты составляет) 185,6 кбит/с для GMSK, 556,8 кбит/с для 8-PSK. Очевидно, что доступная пользователю скорость передачи данных будет меньше из-за необходимости использования канального кодирования. Используемые коэффициенты канального кодирования лежат в пределах от $R=0,38$ до $R=1$.

Адаптация канала при помощи выбора метода модуляции и кодирования в зависимости от качества радиоканала возможна только при наличии обратной связи между приемником и передатчиком. В таблице 3.7 приведены возможные комбинации кодирования и модуляции. Они поделены на три семейства (А, В и С). Коэффициент кодирования может изменяться в рамках одного семейства.

Радиоблок – это наименьший элемент передаваемых в рамках системы EDGE данных. Структура радиоблока при модуляции 8-PSK показана на рисунке 3.16. Каждый радиоблок содержит один или два блока пакетных данных (*Packet Data Unit - PDU*). Количество PDU в радиоблоке зависит от выбранной схемы модуляции и кодирования. После выполнения перемежения передача радиоблока производится четырьмя кадрами, причем каждый из них – на своей несущей, используя скачкообразную перестройку частоты. Кодированные радиоблоки содержат по 1392 бита в случае использования 8 – PSK модуляции и по 464 бита в случае GMSK модуляции.

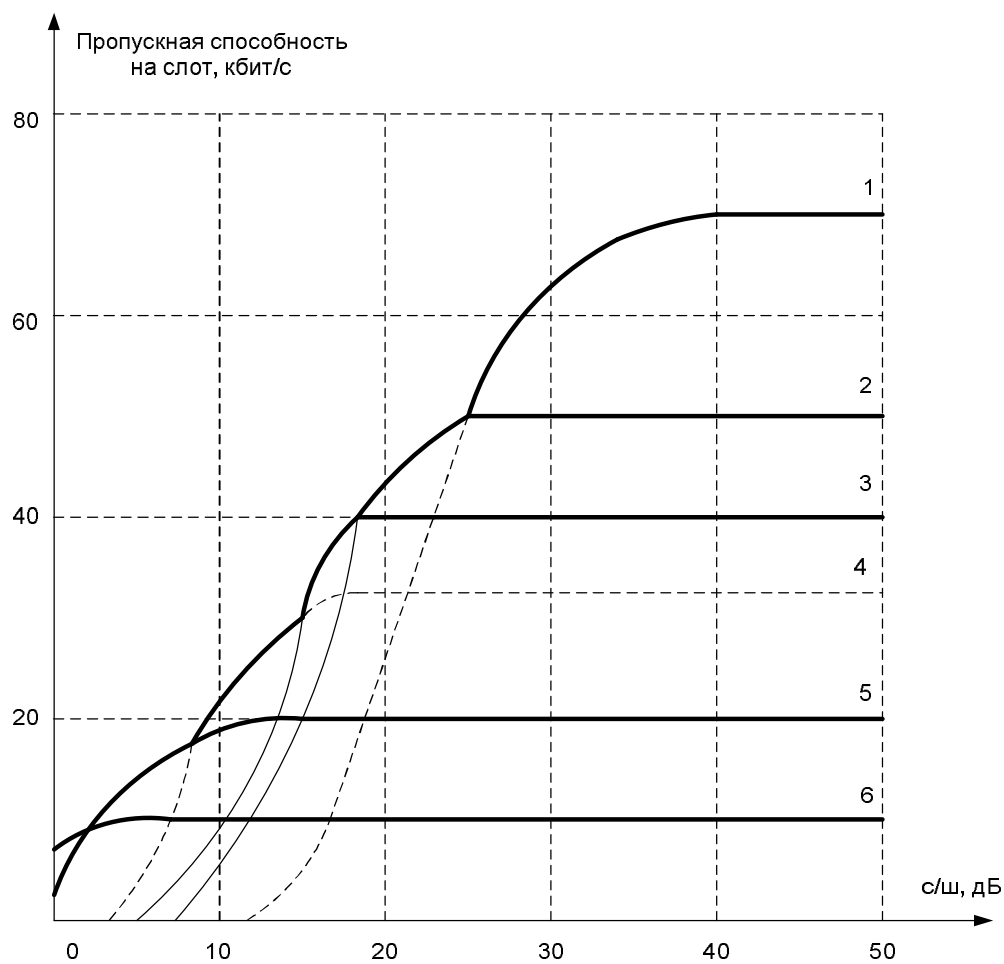


Рисунок 3.15 – Пропускная способность на слот для различных комбинаций кодирования и модуляции

Таблица 3.7 – Схемы модуляции и кодирования, используемые в системе GPRS

Схема	Модуляция	Максимальная скорость, кбит/с	Коэффициент кодирования	Кодирование заголовка	PDU/20 мс	Размер PDU, байт	Семейство
MSC-9	8-PSK	473	1,0	0,36	2	74	A
MSC-8	8-PSK	435	0,92	0,36	2	68	A
MSC-7	8-PSK	358	0,76	0,36	2	56	B
MSC-6	8-PSK	234	0,49	1/3	1	74	A
MSC-5	8-PSK	179,2	0,37	1/3	1	56	B

Таблица 3.7 - Продолжение

MSC-4	GMSK	141	1,0	1/2	1	44	C
MSC-3	GMSK	119	0,8	1/2	1	37	A
MSC-2	GMSK	90	0,66	1/2	1	28	B
MSC-1	GMSK	70,4	0,53	1/2	1	22	C

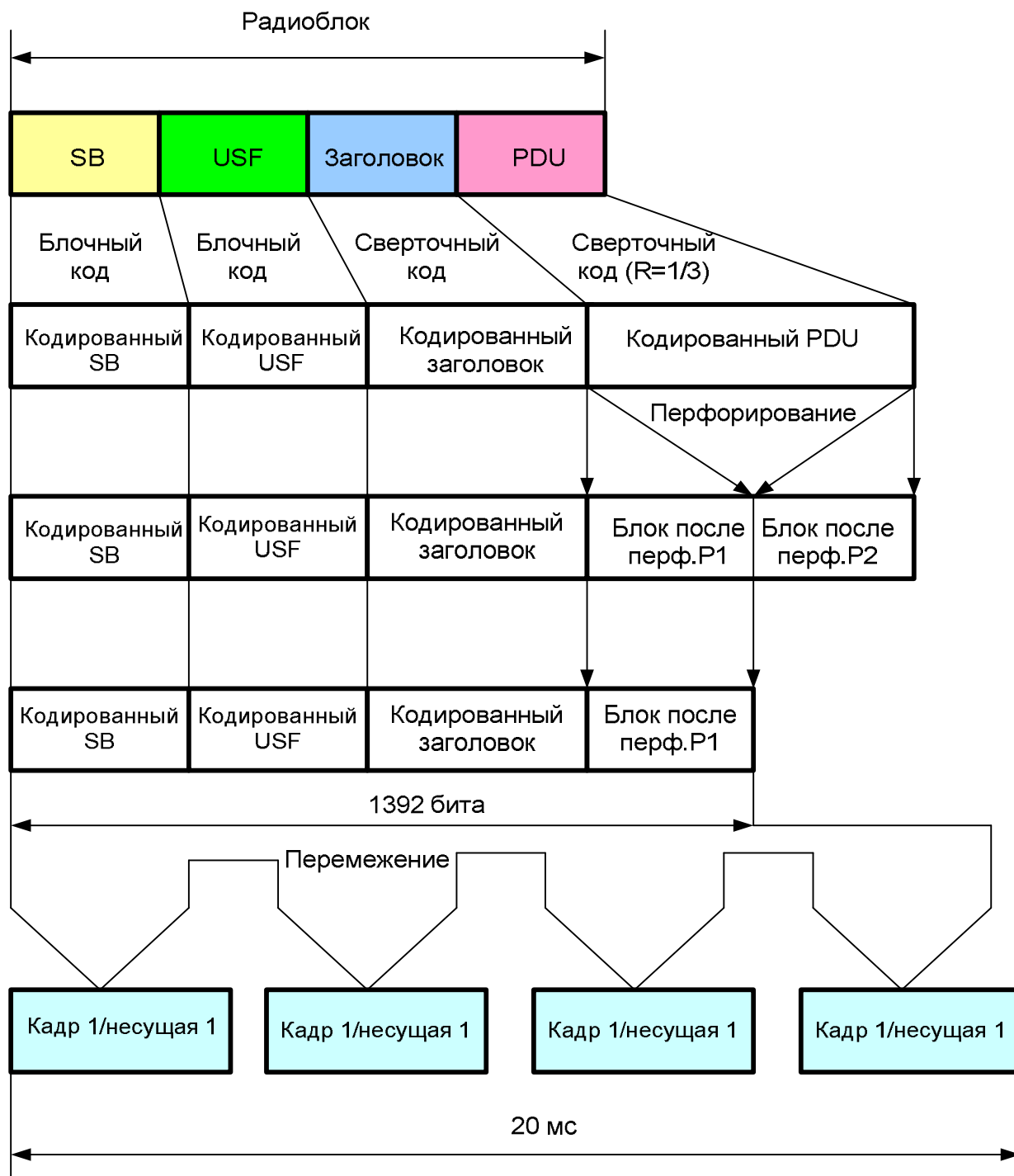


Рисунок 3.16 – Пример формата и кодирования радиоблока в системе EDGE с 8-PSK модуляцией

Структура кодированных и некодированных блоков будет несколько различаться в зависимости от выбора схемы модуляции и кодирования. Тем не менее, общая схема (рисунк 3.16) остается прежней.

В случае непрозрачной передачи данных, как правило, используется метод ARQ. В основе стандартного метода ARQ лежит добавление CRC- битов четности, вычисленных передатчиком, к концу блока данных. В приемнике CRC – биты заново рассчитываются по принятому блоку данных. Если вычисленные биты совпадают с принятыми, то приемник посылает подтверждение приема (ACK), и передатчик начинает передавать следующий блок. Если рассчитанные приемником CRC – биты не совпадают с принятыми, то весь блок отбрасывается и подлежит повторной передаче. Вместо простой схемы ARQ может использоваться *принцип ARQ с нарастающей избыточностью (Incrementdancy Redundancy - IR)*.

В основе метода IR ARQ лежит повторное использование ошибочного блока для детектирования ошибок. В процессе кодирования на выходе сверточного кодера применяется перфорирувание по двум или трем различным схемам (P1, P2 или P3). Сначала передается кодированный блок, подвергнутый перфорируванию по схеме P1. Если в нем обнаружены ошибки, то передаются биты, полученные при перфорирувании по схеме P2, которые добавляются к ранее переданному блоку. Затем этот блок декодируется. При этом возрастает количество битов четности, и декодирование целого блока приводит к гораздо лучшей коррекции ошибок. Если были получены все биты, рассчитанные по всем схемам перфорирувания, а ошибки не были устранены, то повторяется весь процесс передачи блока.

Таким образом, технология EDGE позволяет без особых временных и финансовых затрат значительно улучшить качество предоставляемых услуг, что делает эту технологию особо привлекательной. Это подтверждает тот факт, что более 90% всех операторов, которые эксплуатируют сети стандарта GSM, предоставляют услугу доступа в Интернет по технологии EDGE.

3.11 Контрольные вопросы

1. Какой вид множественного доступа применяется в стандарте GSM?
2. Поясните структуру временных кадров в стандарте GSM.
3. Назовите основные элементы структуры системы GSM.
4. Какая передача данных считается прозрачной (непрозрачной)?
5. В чем заключается суть технологии HSCSD?
6. Поясните суть технологии GPRS.
7. Поясните принцип технологии EDGE.
8. Какие основные усовершенствования применяются на физическом уровне в системе EDGE?
9. Какие виды модуляции применяются в системе EDGE?

4 Передача данных в сотовых системах связи с кодовым разделением каналов

Принципы технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов достаточно подробно рассмотрены в [15]. В данном разделе рассматриваются вопросы, касающиеся организации каналов передачи данных в системах с CDMA.

4.1 Стандарты систем сотовой связи, использующие технологию CDMA

Технология сотовой системы подвижной радиосвязи, в которой используется множественный доступ с кодовым разделением каналов CDMA (Code Division Multiple Access) - была разработана и предложена для коммерческого применения компанией Qualcomm (США).

Основные технические требования к системе CDMA были впервые опубликованы в 1993 г. в ряде стандартов Ассоциации промышленности связи США (TIA) - Telecommunications Industry Association/Industries Association Interim Standard:

- IS-95 - CDMA радиоинтерфейс;*
- IS-96 - CDMA речевые службы;*
- IS-97 - CDMA подвижная станция;*
- IS-98 - CDMA базовая станция;*
- IS-99 - CDMA службы передачи данных.*

Одно из важных требований, предъявляемых к системам второго поколения, — гибкость технологии и возможность ее постепенного развития, проходящего без кардинального изменения существующей инфраструктуры сетей.

Первым стандартом сотовой мобильной связи с кодовым разделением каналов стал стандарт IS-95A, который был опубликован в мае 1995 года как улучшенная и переработанная версия стандартов системы CDMA. В разработке IS-95A принимали активное участие американские фирмы Qualcomm, Motorola, Lucent Technologies, InterDigital, к которым впоследствии подключились NEC, Samsung, LG и ряд других компаний.

Современные сети, базирующиеся на стандарте IS-95, обеспечивают передачу сигнала со скоростью 9,6 кбит/с (с кодированием) и 14,4 кбит/с (без кодирования), тогда как исходные спецификации cdmaOne (коммерческое название IS-95) предполагали скорость передачи 8 кбит/с, 13 кбит/с и 8 кбит/с EVRC (Enhanced Variable Rate Vocoder). В настоящее время повсеместно применяется версия стандарта IS-95a.

Существует несколько модификаций стандарта IS-95: IS-95a, IS-95b, IS-95c, IS-2000 (рисунок 4.1).

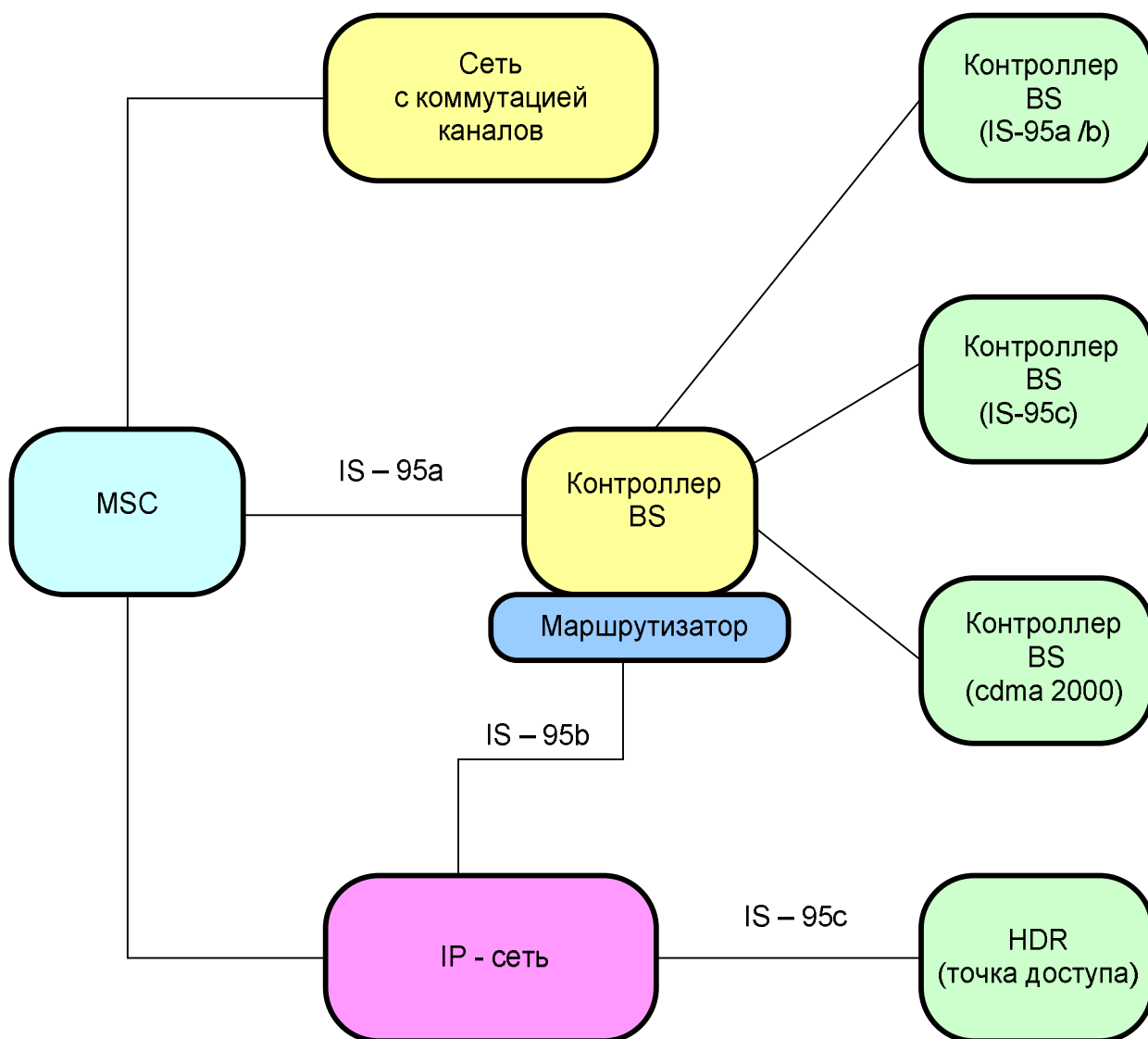


Рисунок 4.1 – Развитие стандарта IS - 95

Версия стандарта IS – 95b включает в себя использование полосы частот стандарта IS – 95, а также полосы службы персональной связи PCS. Этот стандарт позволяет передавать речевые сигналы, и такие данные со скоростью 115,2 кбит/с при одновременном использовании до восьми каналов RS2.

Версия IS-95b основана на объединении нескольких каналов CDMA, организуемых в прямом направлении (от базовой станции к мобильной). Скорость может увеличиваться до 28,8 кбит/с (при объединении двух каналов по 14,4 кбит/с) или до 115,2 кбит/с (8 каналов по 14,4 кбит/с). Сети на основе IS-95b смогут обеспечивать доступ в Internet до появления систем третьего поколения. Однако для того, чтобы предоставлять услуги пакетной передачи, контроллер базовой станции нужно дооснастить маршрутизатором. В спецификациях этого стандарта предусмотрено качественное улучшение характеристик обслуживания за счет снижения потерь при переходе абонента от одной базовой станции к другой, а также повышение точности контроля мощности до 0,25 дБ, организация каналов приоритетного доступа и другие усовершенствования.

В версии IS-95с модификации коснулись повышения частотной эффективности и увеличения емкости телефонной сети в два раза. Спецификациями предусматривается дополнительный канал с ортогональным сдвигом несущей, по которому может передаваться полный кодовый ансамбль сигналов (т. е. 64 кода Уолша), такой же как и по синфазному каналу. Системы на базе IS-95с обратно совместимы с сетями на основе IS-95a и IS-95b и сохраняют прежнюю полосу частот — 1,25 МГц. По сравнению с предыдущими версиями скорость передачи в системе возрастает до 144 кбит/с; при этом сократится энергопотребление терминала.

В настоящее время разрабатывается новая модификация IS-95-HDR (High Data Rate), которая призвана расширить возможности высокоскоростной передачи данных. В прямом канале передачи, поддерживающем этот стандарт, предполагается повышение скорости до 1 Мбит/с и даже более. В обратном канале скорость по сравнению с IS-95с не меняется. Возможности, которые предоставит IS-95-HDR, в первую очередь ориентированы на совместную работу с сетями передачи данных, имеющими асимметричный трафик.

Стандарт IS – 2000 описывает систему радиосвязи CDMA третьего поколения. По сравнению с другими модификациями, IS – 2000 имеет множество дополнительных возможностей. Во всех модификациях сохраняется структура стандарта IS – 95.

Последующее развитие технологии CDMA будет проходить в рамках создания сетей семейства IMT-2000.

4.2 Каналы передачи данных в стандарте IS – 95a

4.2.1 Общие сведения о стандарте IS – 95a

Система CDMA IS-95 фирмы Qualcomm рассчитана на работу в диапазоне частот 800 МГц, выделенном для сотовых систем стандартов AMPS, N-AMPS и D-AMPS (Стандарты TIA IS-19, IS-20; IS-54; IS-55, IS-56, IS-88, IS-89, IS-90, (S-553). В таблице 4.1 приведены основные характеристики стандарта IS – 95a [15, 17, 18].

Таблица 4.1 – Основные характеристики стандарта CDMA IS – 95a

Характеристики	Значения
Диапазон частот передачи MS	824,040 – 848,860 МГц
Диапазон частот передачи BTS	869,040 – 893,970 МГц
Относительная нестабильность несущей частоты BTS	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$

Продолжение таблицы 4.1

Относительная нестабильность несущей частоты BTS	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$
Относительная не стабильность несущей частоты MS	$\pm 2,5 \cdot 10^{-6}$
Вид модуляции несущей частоты	QPSK (BTS), 0-QPSK (MS)
Ширина спектра излучаемого сигнала: по уровню минус 3 дБ по уровню минус 40 дБ	1,2 МГц 1,5 МГц
Метод расширения спектра	DS-CDMA
Тактовая частота ПСП	1,2288 МГц
Количество элементов в ПСП для: BTS MS	$(2^{15} - 1)$ $(2^{42} - 1)$
Количество каналов BTS на 1 несущей частоте	1 пилот-канал, 1 канал синхронизации, 7 каналов перс. вызова, 55 каналов связи
Количество каналов MS	1 канал доступа, 1 канал связи
Скорость передачи данных: в канале синхронизации, в канале перс. вызова и доступа, в канале связи	1200 бит/с; 9600, 4800 бит /с; 9600, 4800, 2400, 1200 бит/с
Кодирование в каналах передачи BTS (канал синх., перс. вызова, связи)	сверточный код $\gamma=1/2$, длина кодового ограничения $K=9$
Кодирование в каналах передачи MS	сверточный код $\gamma=1/3$, $K=9$; 64-ичное кодирование ортогональными сигналами на основе функций Уолша
Требуемое для приема отношения энергии бита информации к спектральной плотности шума (E_0 / N_0)	6-7 дБ
Максимальная эффективная излучаемая мощность BTS	до 50 Вт
Максимальная эффективная излучаемая мощность MS: 1 класса, 2 класса, 3 класса	до 6,3 Вт; 2,5 Вт; 1,0 Вт

Система CDMA IS-95 даёт возможность каждому пользователю внутри соты использовать тот же самый радиоканал и всю выделенную полосу частот. Пользователь в смежной соте использует эту же полосу частот. Вместо разделения спектра или временных слотов (как в других технологиях ССПС), каж-

дому пользователю назначается *фрагмент шумоподобной несущей*. Поскольку её фрагменты являются квазиортогональными, возникает возможность отвести всю ширину выделенного канала для каждого пользователя. Благодаря решению проблемы *ближней-дальней зоны* и динамическому управлению мощностью вся полоса частот **1,25 МГц** используется каждым пользователем и она же вновь используется в смежной соте. Емкость на одну соту определяется балансом между требуемым отношением сигнал/шум для каждого пользователя и фактором сжатия кодовой последовательности. *Таким образом, система абсолютно не нуждается в частотном планировании.* Для уменьшения затрат операторов подвижной связи и облегчения перехода от AMPS к CDMA в системе CDMA предусмотрена ширина канала (1,25 МГц), такая же, как и у AMPS. В отличие от других сотовых систем, трафик одного канала не является постоянной величиной и зависит от голосовой активности и требований, предъявляемых к сети.

Безопасность или конфиденциальность является свойством технологии CDMA, поэтому во многих случаях операторам сотовых сетей не требуется специального оборудования шифрования сообщений.

Система CDMA Qualcomm построена по методу прямого расширения спектра частот на основе использования последовательностей 64 видов функций Уолша. Для передачи речевых сообщений выбрано речепреобразующее устройство с алгоритмом *CELP* со скоростью преобразования *8000 бит/с (9600 бит/с в канале)*. Возможны режимы работы на скоростях *4800, 2400 и 1200 бит/с*.

В стандарте IS-95 системы CDMA используют 64 функции Уолша, в результате чего можно организовать на одной базовой станции одновременную работу 64 абонентов в одном радиоканале. Разумеется, когда в сети появятся другие базовые станции, то появляются и дополнительные помехи, уменьшающие динамический диапазон и соответственно снижающие количество разговорных каналов. Реально в одном частотном диапазоне шириной 1,25 МГц можно разместить до 20 каналов для сетей мобильной связи. Такое снижение числа каналов связано с необходимостью резервирования каналов в соседних ячейках для функции «мягкого» переключения.

Частотный план стандарта CDMA показан на рисунке 4.2. Ширина радиоканала, как уже упоминалось, равна 1,23 МГц. Расстояние между несущими в стандарте – 1,26 МГц, то есть радиоканалы расположены вплотную друг к другу. Диапазон рабочих частот в прямом канале от 869 до 894 МГц, в обратном – от 824 до 849 МГц. То есть разнос частот передачи и приема составляет 45 МГц.

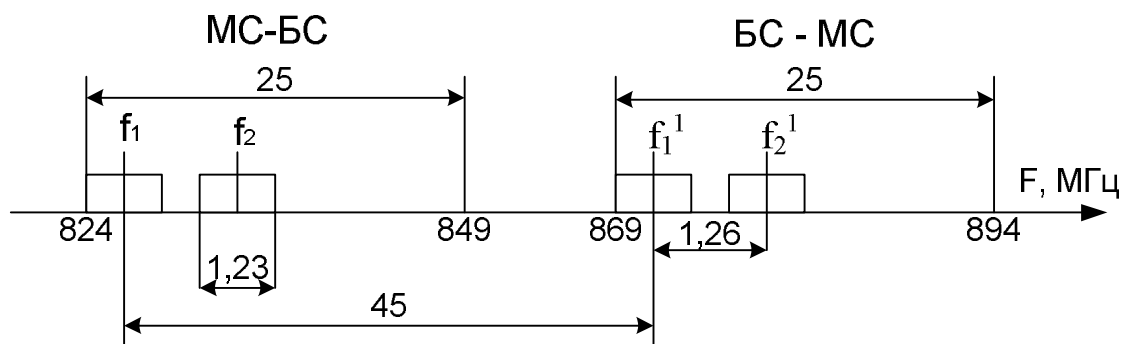


Рисунок 4.2 - Частотный план стандарта IS-95

В сотовой сети CDMA из-за того, что она работает в общей для всех базовых станций полосе частот, не требуется частотно-территориального планирования.

Для снижения требуемого отношения сигнал/шум применяются различные методы обработки сигнала.

Основные характеристики рассматриваемых систем:

- каждый канал расширяется на полосу 1,25 МГц, после чего фильтруется для ограничения спектра;
- скорость передачи для элементарных сигналов псевдослучайного кода равна 1,22 миллионов элементарных символов в секунду. Номинальная скорость передачи данных, называемая RS1 (Rate Set1), равна 9,6 кбит/с и соответствует коэффициенту расширения $G_p = R_{sc} / R = 128$. В стандарте IS-95 возможно использование улучшенного скоростного режима RS2 (14,4 кбит/с);
- модуляция данных осуществляется с помощью двоичной фазовой манипуляции (BPSK);
- используется сверточное кодирование с декодированием по алгоритму Витерби;
- для разнесения по времени используется устройство временного уплотнения импульсных сигналов с интервалом 20 мс;
- сигналы с многолучевым распространением обрабатываются RAKE-приемником. Для пространственного разнесения используется две антенны в каждом секторе соты;
- для разделения по каналам применяется ортогональное кодовое уплотнение;
- регулировка мощности позволяет минимизировать энергию передаваемого сигнала и, следовательно, уменьшить интерференцию.

Эксплуатация первой коммерческой сети сотовой подвижной связи на базе технологии CDMA (IS-95) была начата компанией Hutchison Telephone (Гонконг) в сентябре 1995 года. До этого стандарт IS-95 получил одобрение в Международном Союзе электросвязи (ITU) и вошел в состав Рекомендации M.1073 ITU-R.

Основная цель разработки компанией Qualcomm системы сотовой подвижной связи с кодовым разделением каналов (CDMA) заключалась в необходимости увеличения пропускной способности сети сотовой связи стандарта IS-95 по сравнению с аналоговой системой AMPS (IS-19) не менее, чем на порядок в диапазоне 800 МГц.

Эта цель была успешно достигнута, в результате чего стандарт IS-95 по своей спектральной эффективности превосходит все существующие в настоящее время стандарты цифровой сотовой связи второго поколения (2G) - GSM и D-AMPS (IS-136).

В стандарте IS-95, помимо традиционных услуг голосовой связи, предусмотрена возможность передачи данных со скоростью 14,4 кбит/с в режиме коммутации каналов.

В стандарте IS-95a при трехсекторной конфигурации базовых станций (БС) может быть организовано от 60 до 100 одновременно работающих каналов голосовой связи со скоростью 9,6 кбит/с в полосе частот радиоканала 1,25 МГц.

Стандарт IS-95a также используется в диапазоне 1900 МГц, в котором работают американские цифровые сети персональной связи (PCS).

Стандарт IS-95B, IS-96C, IS-95HDR

Компания Qualcomm в 1995 году предложила к внедрению несколько эволюционных технологий на базе стандарта IS-95, которые на основе объединения нескольких логических каналов CDMA позволяют увеличить в несколько раз скорость передачи данных в прямом направлении в прямом канале от базовой станции к мобильной.

4.2.2 Архитектура сети CDMA IS-95

В составе любой сотовой сети (в том числе, основанной на технологии CDMA) есть несколько стандартных элементов:

- *Абонентские терминалы.* Частными случаями терминала являются беспроводной, мобильный, телефонный аппараты. Другие виды таких устройств - одноканальные и многоканальные фиксированные абонентские терминалы и появляющиеся в последнее время беспроводные PBX, к которым можно подключать обычные телефонные аппараты и прочие телефонные устройства (факсы, модемы и т.д.);
- *Базовые приемо-передающие станции.* Они отвечают за организацию радиоканалов связи с абонентскими терминалами и формируют структуру сотовой сети. Обычно производители стремятся сделать базовые станции как можно менее интеллектуальными, вынося решение всех сложных задач на следующий инфраструктурный уровень;
- *Контроллеры базовых станций.* Здесь обеспечивается кодирование речи в соответствии с принятыми в CDMA вокодерными алгоритмами и поддерживается мягкая передача вызова от одной базовой станции к другой при движении абонента. Такие контроллеры предоставляют системе управления сетью информацию о своем состоянии и состоянии подключенных к ним базовых станций. На

рисунке 4.3 приведена обобщенная структурная схема сети сотовой подвижной радиосвязи CDMA IS-95.

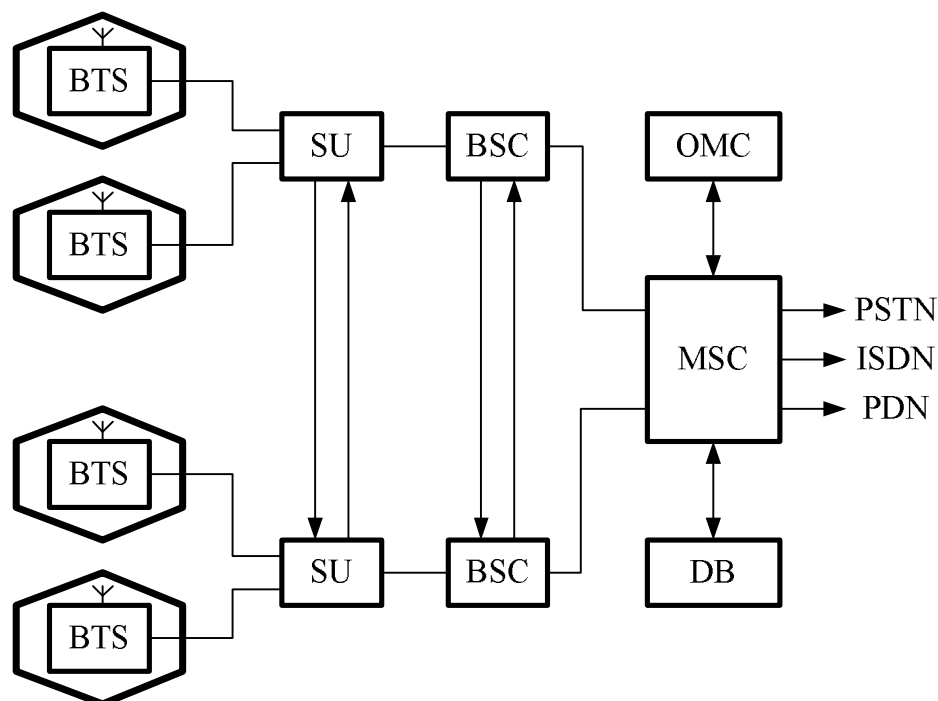


Рисунок 4.3– Схема сети CDMA IS-95

На схеме рисунка 4.3 обозначены:

- BTS – базовая приемопередающая станция;
- SU – устройство выбора кадра;
- DB – база данных об абонентах и оборудовании;
- MSC – центр коммутации;
- BSC– контроллер базовой станции;
- OMS – центр управления и обслуживания;
- PSTN – телефонная сеть общего пользования;
- ISDN – цифровая сеть с интеграцией служб;
- PDN – сеть пакетной коммутации.

Основное отличие заключается в том, что в состав сети CDMA IS-95 включены *устройства оценки качества и выбора кадров (SU)*.

Передача речи и данных по стандарту IS-95 осуществляется кадрами длительностью 20 мс. При этом скорость передачи в пределах сеанса связи может изменяться от 1,2 до 9,6 кбит/с, но в течение одного кадра она остается неизменной. Если количество ошибок в кадре превышает допустимую норму, то искаженный кадр удаляется [17].

4.2.3 Каналы в системе сотовой связи стандарта IS-95

В системе стандарта IS-95 различают *физические (частотные) каналы* и *логические каналы*. Физические каналы характеризуются несущей частотой. Логические каналы определяются своим назначением и формируются внутри физического канала. Каналы для передачи от базовой станции называются *прямыми* (линия «вниз»), а для передачи от мобильной станции – *обратными* (линия «вверх»)-(рисунок 4.4).

Стандартом IS-95 предусмотрена работа всех абонентов прямого канала связи на одной частоте, а абонентов обратного канала связи на другой частоте, что снижает уровень взаимных помех между прямым и обратным каналами.

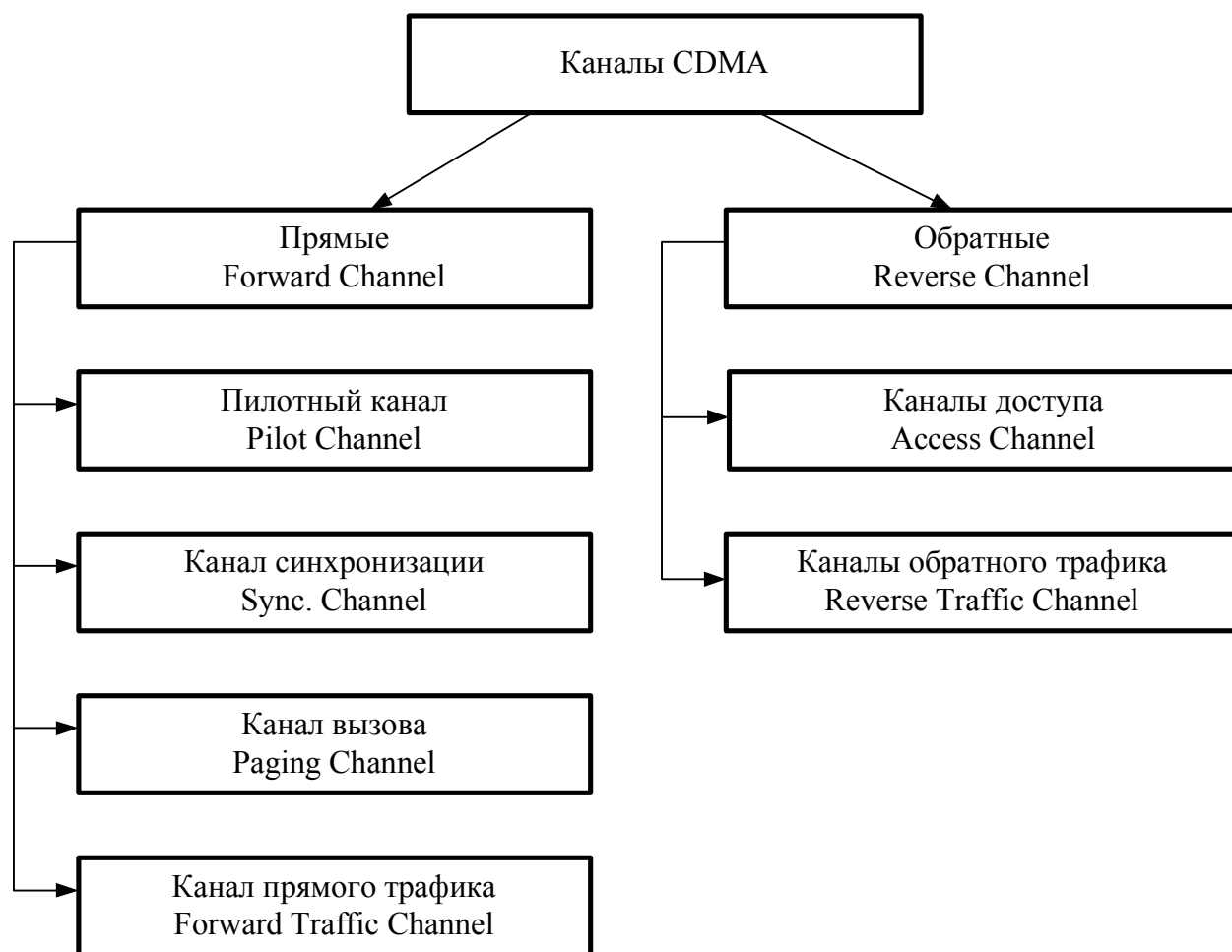


Рисунок 4.4 – Каналы системы CDMA

4.2.3.1 Прямой канал связи

Структура прямого канала показана на рисунке 4.5. В прямом канале можно выделить следующие типы каналов: *пилотный канал, синхроканал, канал вызова, канал трафика*.

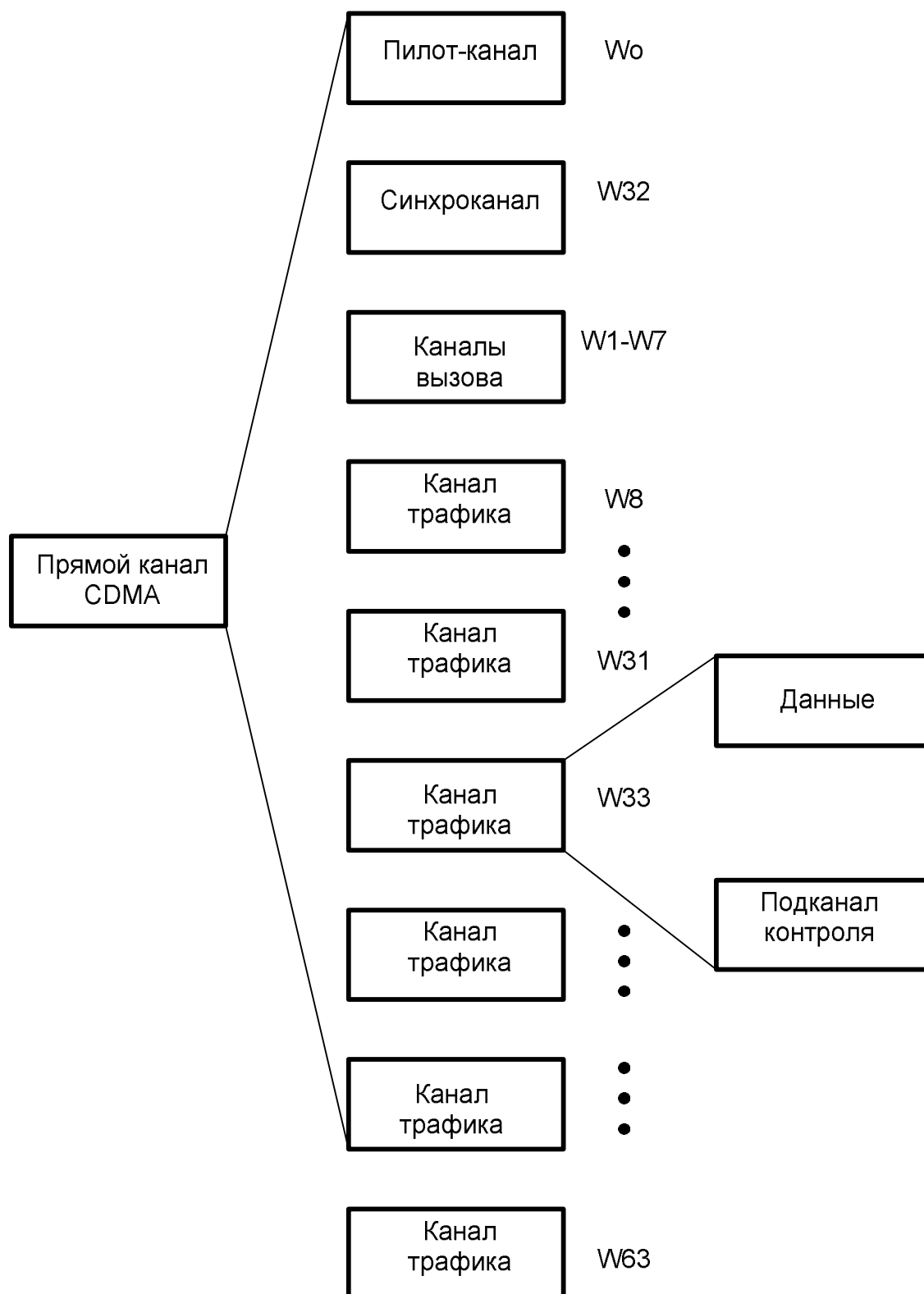


Рисунок 4.5 – Структура прямого канала

Упрощенная схема формирования этих каналов на передаче приведена на рисунке 4.6.

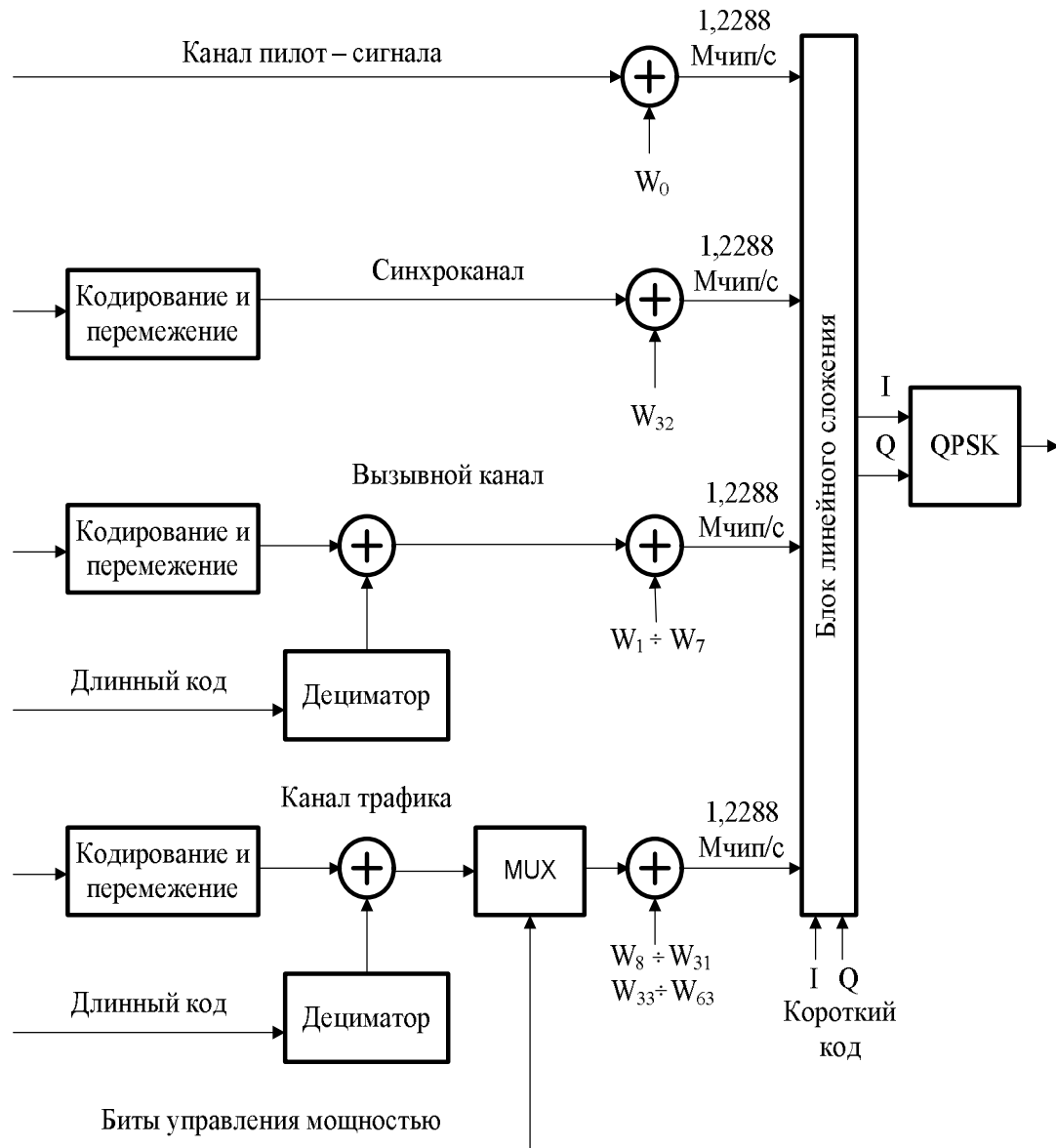


Рисунок 4.6 – Упрощенная схема формирования каналов на базовой станции

Характеристика каналов базовой станции приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики каналов базовой станции

Параметр	Канал пилот-сигнала	Синхроканал	Вызывной канал	Канал трафика
Число одновременно передаваемых каналов	1	1	7	55
Входная скорость, кбит/с	н/п	1,2	2,4 4,8 9,6	1,2 2,4 4,8 9,6
Скорость сверточного кодирования	н/п	1/2	1/2	1/2
Скорость на выходе сверточного кодера, кбит/с	н/п	4,8	4,8 9,6 19,2	2,4 4,8 9,6 19,2
Выходная скорость кодированного потока, кбит/с	н/п	4,8	19,2	19,2
Чиповая скорость, Мчип/с	1,2288	1,2288	1,2288	1,2288
Метод модуляции в радиоканале	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK

Примечание: н/п – не применимо.

Под чиповой скоростью (от англ. Chip rate) понимается скорость следования символов сигнала с расширенным спектром.

В стандарте IS-95 при формировании сигналов используется метод прямого расширения спектра (DS) на основе ансамбля из 64 ортогональных функций Уолша. При этом могут применяться три группы кодов: коды Уолша, короткие и длинные коды. Функции, реализуемые этими кодами на базовой станции, приведены в таблице 4.3.

Сигналы различных каналов взаимно ортогональны, что гарантирует *отсутствие взаимных помех между ними на одной базовой станции*. Внутрисистемные помехи в основном возникают от передатчиков других базовых станций, работающих на той же частоте, но с иным циклическим сдвигом.

Таблица 4.3 – Назначение и параметры кодовых последовательностей

Тип кода	Длина кода	Выполняемые функции
Код Уолша	64	Кодовое уплотнение или разделение 64 каналов CDMA
Короткий код	32768	Разделение сигналов базовых станций по величине циклического сдвига
Длинный код	$24^2 - 1$ ($4,4 \cdot 10^{12}$)	Прореженный длинный код – как опорная последовательность скремблера

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 систем автоподстройки фазы и задержки когерентного приемника МС, а с другой - точность измерений параметров сигнала БС, достаточная для процедур RAKE (многолучевого разнесения), эстафетной передачи и управления мощностью БС. Излучение пилот-сигнала происходит непрерывно.

Согласно рисунку 4.6 пилотному каналу присвоена нулевая функция Уолша W_0 , то есть последовательность из одних нулей. Информационные данные по этому каналу не передаются. После объединения с сигналами других логических каналов (рисунок 4.6) суммарный сигнал поступает на модулятор QPSK.

После вхождения в синхронизм с пилот-сигналом МС располагает информацией о фазе принимаемой несущей, временных границах чипов и периоде короткой ПСП (один период занимает 26,666 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 центра коммутации мобильной связи, значение мощности сигнала в пилотном канале, параметры длинной ПСП, скорость передачи данных в канале персонального вызова.

За каналом синхронизации постоянно закреплена меандровая последовательность Уолша - W_{32} (при упорядочивании последовательностей по Адамару). 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 совпадает с одним периодом короткой ПСП и 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} . Как можно видеть, 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. Иными словами, 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.

Как в системе обеспечить синхронизацию? Для синхронизации работы АС можно ввести некую дополнительную последовательность и изучать ее *одновременно (синхронно)* с другими последовательностями. Затем отдельно обрабатывать ее в приемниках АС и по ней подстраивать тактовые частоты каждой АС. *Такой последовательностью в системе CDMA и является синхронизирующая последовательность.*

Второе условие, заключающееся в формировании каждой из последовательностей в строго определенных моменты времени, выполняется следующим образом - здесь имеется своё внутреннее время, в соответствии с которым работает система. *Информацию о нем АС получают по пилот - каналу на начальном этапе вхождения в сеть.*

Синхропоследовательность (СП) представляет собой короткую M - последовательность, имеющую небольшой период повторения, для быстрого ее обнаружения. В данной системе она имеет длину $N_{СП} = 2^{15} - 1 \approx 32767$ элемента, а период её повторения составляет:

$$T_{СП} = \frac{N_{СП}}{f_T} = \frac{2^{15} - 1}{1,2288 \cdot 10^6} \approx 26,67 \text{ мс}$$

Во всех БС системы используется одна и та же СП, но с разным циклическим сдвигом относительно какого-то нулевого сдвига. Это позволяет АС различать сигналы БС и настраиваться на работу с конкретной БС. Информацию о

нулевом сдвиге - о внутреннем времени в системе АС получает, как было отмечено, по синхроканалу.

СП в каждой БС может иметь циклический сдвиг не менее чем $2^6 = 64$ элемента. Определим число БС, которые может различать АС:

$$n_{BC} = \left(\frac{N_{СП}}{2^6} \right) = \left(\frac{2^{15} - 1}{2^6} \right) = 511 \text{ базовых станций}$$

Таким образом, имеется возможность различать до 511 БС. Это означает, что АС может различать сигналы разных БС даже в районах с микросотовой структурой (при радиусе соты десятки - сотни метров). Двум БС может быть присвоена СП с одним и тем же циклическим сдвигом, но необходимо, чтобы они не находились одновременно в зоне радиовидимости одной АС [2]. Использование сдвига СП позволяет каждой БС применять один и тот же ансамбль ПУ для разделения каналов. При этом необходимо отметить, что полезный сигнал данной БС, использующей одни и те же ПУ, будет являться помехой для сигналов АС в соседних сотах, но он будет ослаблен как минимум в 64 раза из-за временного смещения СП на 64 элементарных символа [7].

Синхронизация работы базовых станций в сети осуществляется по каналам связи спутниковой навигационной системы GPS [15].

Канал персонального вызова (*вызывной канал*) предназначен для вызова МС и передаче ей системной информации. После получения БС сигнала подтверждения от МС по этому же каналу передается информация об установлении соединения и назначении канала связи. Сообщения, передаваемые по каналу вызова, могут быть четырех типов:

- а) заголовок;
- б) пейджинг (вызов);
- в) ордер (команда);
- г) назначение каналов.

Заголовок содержит информацию о важнейших параметрах конфигурации системы и передается на МС в виде следующих типовых сообщений: параметры системы; параметры доступа; граничный список; список CDMA-каналов.

Первое из названных сообщений содержит сведения о параметрах эстафетной передачи: пороге включения, пороге выключения, значении таймера выключения и др., параметрах регулировки мощности в прямом канале и т.п.

Сообщение о параметрах доступа содержит информацию о конфигурации канала доступа МС: числе проб при установлении доступа, времени ожидания подтверждения, интервале между отдельными попытками доступа и др., а также о некоторых параметрах управления мощностью в обратном канале: начальном значении мощности излучения в канале доступа, шаге приращения мощности излучения и др.

Сообщение о граничном списке содержит перечень циклических сдвигов ПСП соседних БС или секторов, использование которого позволяет оптимизировать процесс эстафетной передачи.

Сообщение о списке CDMA-каналов позволяет МС узнать расположение тех полос (шириной 1,25 МГц) частотного плана, в которых размещены каналы

персонального вызова. Указанные сообщения постоянно принимаются МС, а их содержание меняется с течением времени в зависимости от изменения положения МС в сети.

Пейджинговое сообщение содержит вызов, адресованный одной конкретной МС либо группе МС.

Сообщение типа "ордер" охватывает широкий класс команд управления МС. Данные сообщения используются для подтверждения регистрации МС, ее блокировки в состоянии сбоя и т.п.

Сообщения о назначении каналов указывают МС выделенный канал трафика, назначают ей другой канал персонального вызова и др.

В отличие от канала синхронизации, скорость поступления информации в вызывном канале составляет 4,8 или 9,6 кбит/с. Исходный битовый поток проходит через сверточный кодер и (только при входной скорости в 4,8 кбит/с) устройство повторения, так что при любой из двух начальных скоростей скорость кодированного потока оказывается равной 19,2 кбит/с. После осуществления блокового перемежения в пределах 20-миллисекундного кадра поток данных скремблируется децимированной длиной ПСП периода $2^{42} - 1$, а затем подвергается расширению спектра так же, как это делалось для уже рассмотренных каналов: суммируется по модулю два с отведенной каналу функцией Уолша из набора $W_1 - W_7$. Далее следует объединение с остальными каналами.

Символы длиной (как и короткой) ПСП имеют частоту следования 1,2288 Мчип/с, и потому для скремблирования потока после перемежения из длинной ПСП выбирается каждый 64-й символ (децимация с индексом 64). Маска генератора длинной ПСП, *устанавливающая его начальное состояние*, жестко связана с номером канала персонального вызова. Формирование же самой длинной ПСП осуществляется с помощью полинома

$$f(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x + 1.$$

Число вызывных каналов в БС может регулироваться в пределах от 1 до 7. Все вызывные каналы поделены на временные интервалы (слоты), каждый из которых назначается конкретной АС. По ним АС получает команды управления и служебные сообщения от БС.

Таким образом, за каждой АС в данной *сете* закреплён один из вызывных каналов и один из временных интервалов в нем. Период повторения нужных слотов может находиться в пределах 2... 128 с. АС сканирует только нужные временные участки, отключаясь в перерывах между ними. Это позволяет обеспечить существенную экономию энергии источника питания в таком режиме - режиме ожидания АС.

Сообщения по вызывным каналам получают все АС, находящиеся в зоне обслуживания данной БС, их число может достигать несколько тысяч. Число вызывных каналов и их временное деление вполне позволяет обслужить такое количество АС. К примеру, если информация каждой АС передаётся в течение

слота равного 5 кадрам (один кадр 20 мс) и период повторения слотов 128 с, то по *одному служебному каналу* информацию может получать 1280 АС.

$$n_{AB} = \frac{128}{5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 1280 \text{ абонентов}$$

Остальные 55 последовательностей W_9 - W_{63} определяют номер абонентского канала.

Длинная последовательность предназначена для скремблирования информационной последовательности. При скремблировании информационной последовательности *для каждой АС используется своя длинная последовательность*. Длинная последовательность – это ПСП с большим периодом повторения. Это необходимо для создания условий, при которых в случае несанкционированного перехвата информации трудно было бы определить структуру длинной последовательности и соответственно выделить информационную последовательность. При длине длинной последовательности $N_{ДП} = 2^{42} - 1 \approx 4,4 \cdot 10^{12}$ элемента и частоте синхронизации в сети $f_T = 1,2288$ МГц, период повторения ДП составляет:

$$T_{ДП} \frac{N_{ДП}}{f_T} = \frac{2^{42} - 1}{1,2288 \cdot 10^6} \approx 41,45 \text{ суток}$$

Все 64 прямых канала связи одновременно используют общую полосу частот.

Последовательности Уолша при отсутствии относительных временных смещений обладают свойствами ортогональности. Это означает, что при работе канала на любой из 64 последовательностей помехи в этом канале от остальных последовательностей будут полностью отсутствовать.

Следует подчеркнуть, что условием для этого является *синхронизация всех АС и БС в сети*.

Под синхронизацией здесь понимается:

- единая тактовая частота в системе;
- формирование каждой из последовательностей в строго определенные моменты времени.

Каналы прямого трафика служат для передачи речевой информации и данных, а также информации сигнализации от БС к МС. Структура канала прямого трафика за небольшим исключением в точности повторяет структуру канала персонального вызова. Основное отличие заключается в присутствии устройства мультиплексирования потока информационных данных и битов регулировки мощности (РСВ), 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 информационных данных подвергается процедуре блокового перемежения на длительности кадра в 20 мс, а затем скремблируется децимирован-

ной длиной ПСП, подобно тому, что было в канале персонального вызова. Единственное отличие состоит в том, что маска, задающая начальное состояние генератора ПСП, определяется электронным серийным номером (ESN) 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-х наиболее значимых битов с выхода дециматора.

Мультиплексированный поток данных манипулирует канальную 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, причем 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 объединяется с сигналами пилот-канала, канала синхронизации и вызова, вслед за чем поступает на модулятор.

Подводя итог вышесказанному, можно отметить, что замысел кодового уплотнения каналов на примере линии "вниз", т. е. от базовой станции (БС) к абонентской (АС), сводится к следующему:

- N информационным потокам присваивается своя кодовая псевдослучайная последовательность (ПСП);
- кодовые последовательности некоррелированы друг с другом;
- бинарные информационные потоки модулируются собственной ПСП;
- канальные широкополосные сигналы складываются в суммирующем устройстве;
- модуляция несущей результирующим сложным широкополосным сигналом и излучение радиосигнала в пространство.

Упомянутое суммирующее устройство в принципе может быть устройством алгебраического суммирования, тогда результирующий сложный сигнал будет представлять собой многоуровневую, в нашем случае 2N-уровневую последовательность. Однако прием и обработка таких сигналов в реальных каналах связи сопряжены с существенными трудностями, поэтому в CDMA принято мажоритарное суммирование канальных сигналов. Мажоритарный сумматор бинарных последовательностей вычисляет знак алгебраической суммы канальных сигналов. Для вычисления такой функции многих переменных существуют специальные логические схемы мажоритарного суммирования.

4.2.3.2 Обратный канал связи

Структура обратного канала связи показана на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Структура обратного канала связи

В обратном канале *канал доступа* обеспечивает связь мобильной станции (МС) с базовой станцией (БС), когда МС еще не использует канал трафика. Канал доступа используется для установления вызова и ответа на сообщения, передаваемых по каналу вызова, команды и запросы на регистрацию в сети. Каналы доступа совмещаются с каналами вызова.

Канал трафика предназначен для передачи речевых сообщений и данных, а также управляющей информации с МС на БС.

Упрощенная структурная схема формирования обратных каналов на передаче приведена на рисунке 4.8.

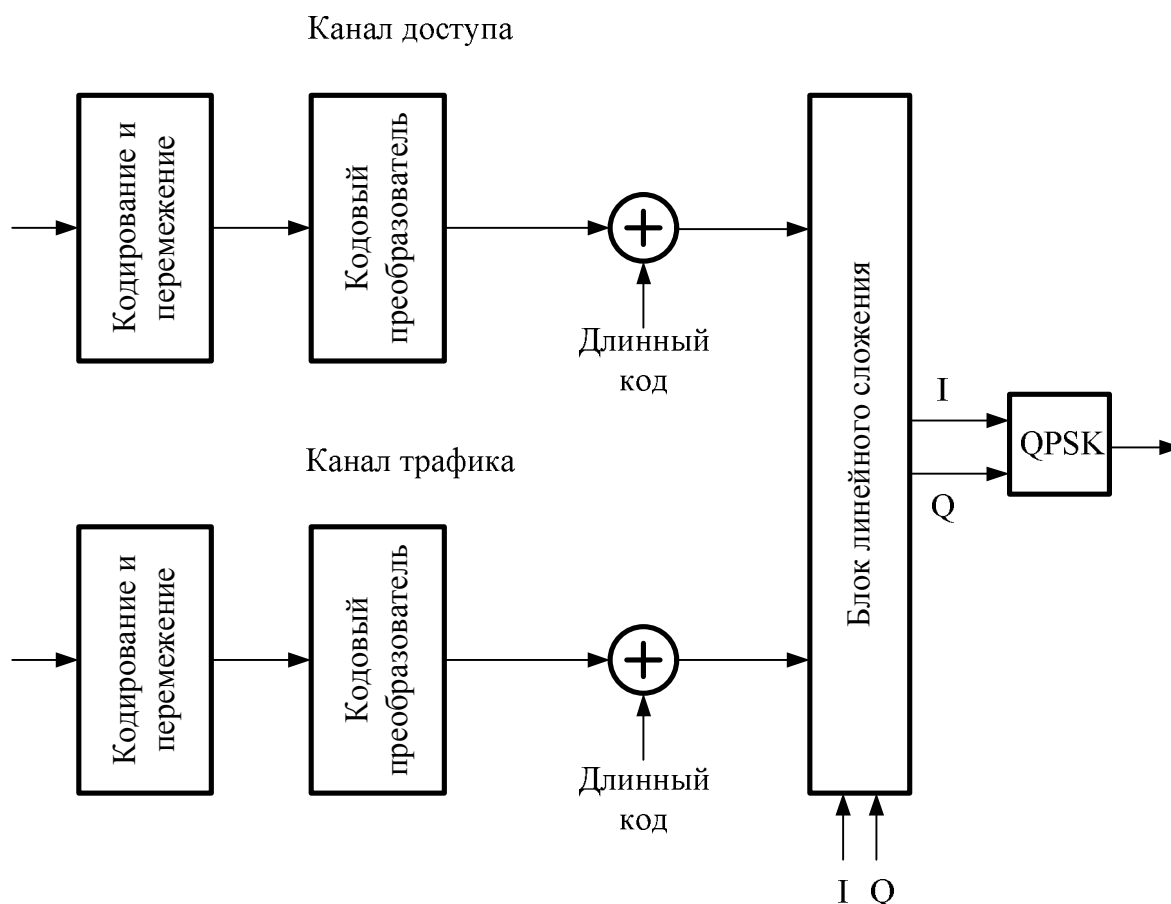


Рисунок 4.8– Схема формирования обратных каналов

Параметры обратных каналов приведены в таблице 4.4.

Рассмотрим процесс формирования сигнала в канале доступа.

Здесь одному информационному символу ставится в соответствие 256 элементарных символов ДП (ее сегмент). Если следует информационный ноль, то вместо него передаются 256 символов ДП, если за ним следует информационная единица, то вместо нее передаются инвертированные следующие 256 символов ДП.

Сигналы, поступающие на БС от всех АС, не являются ортогональными, потому что М – последовательности не являются ортогональными функциями. Уровень помех от соседних каналов будет определяться величиной боковых лепестков взаимнокорреляционных функций сегментов М – последовательностей. Под соседними каналами, в данном случае, понимаются каналы, на которых в данный момент ведется передача.

Таблица 4.4 – Параметры обратных каналов

Параметр	Канал доступа	Канал вызова	Канал трафика
Число одновременно передаваемых каналов	1	1	55
Входная скорость, кбит/с	4.8	1.2 2.4 9.6	1.2 2.4 4.8 9.6
Скорость сверточного кодирования	1/3	1/3	1/2
Скорость на выходе сверточного кодера, кбит/с	14.4	3.6 7.2 28.8	2.4 4.8 9.6 19.2
Выходная скорость кодированного потока, кбит/с	28.8	28.8	19.2
Скорость после кодового преобразования, кбит/с	307.2	307.2	н/п
Чиповая скорость, Мчип/с	1.2288	1.2288	1.2288
Вид модуляции в радиоканале	QPSK	QPSK	QPSK

В каждом из каналов трафика и каналов доступа используются те же последовательности, что и в прямых каналах связи. Однако функции, выполненные некоторыми последовательностями, различаются (таблица 4.5).

Последовательности Уолша служат для помехоустойчивого кодирования ИП (информационной последовательности).

Длинная последовательность (ДП) предназначена для:

- разделения каналов (и одновременно для скремблирования ИП);
- расширения спектра информационной последовательности до рабочей полосы частот Δf .

Таблица 4.5 – Назначение кодовых последовательностей в обратном канале

Тип сигнала	Выполняемые функции
Код Уолша	Помехоустойчивое кодирование
Короткий код ($2^{15} - 1$)	Код с одинаковым фиксированным циклическим сдвигом – как опорный сигнал
Длинный код ($2^{42} - 1$)	Длинный код с разными циклическими сдвигами – как адресная последовательность

Таким образом, в обратном канале связи для разделения каналов от разных АС используется длинная последовательность. За каждой АС (а их в системе связи может быть сотни тысяч) закреплен свой кодовый канал, определяемый ДП, которая не может повторяться у другой АС.

Уточним: в системе связи используется всего одна ДП, а каждой АС присвоен индивидуальный сдвиг этой последовательности относительно какого-то нулевого сдвига, который однозначно определяет ее канал в системе сотовой связи. БС различает АС по сдвигу их ДП. Здесь имеется аналогия с прямым каналом связи, когда АС различает сигналы базовых станций по сдвигу синхропоследовательности (СП).

Сдвиг ДП, которым идентифицируется каждая АС, может осуществляться на величину $2^{15} - 1 = 32767$, то есть на величину, равную длине СП. При этом общее количество АС, обслуживаемых данной системой связи, оказывается равным:

$$n_{AB} = \left(\frac{N_{ДП}}{2^{15}} \right) = \left(\frac{2^{42} - 1}{2^{15}} \right) = 2^{27} \approx 134.2 \cdot 10^6 \text{ абонентов}$$

Синхронизирующая последовательность в обратном канале необходима для того, чтобы сигналы от разных АС поступали на БС одновременно для их синхронной обработки. В этом случае кодовое разделение каналов, осуществляемое за счет использования длинной последовательности, будет реализовано при минимальном уровне помех от соседних каналов, на которых работают другие АС.

Рассмотрим процесс более подробно. АС могут находиться в пределах соты на разном расстоянии от БС, соответственно от ближайших АС сигнал будет приходить раньше. При помощи СП можно выравнивать по времени сигналы, поступающие на БС от абонентских станций. Это может происходить следующим образом: СП излучается базовой станцией, принимается АС, переизлучается ею и принимается приемником БС. При этом период излучаемой СП еще не закончился. Далее фиксируется время от момента приема переизлученной СП (абонентской станцией) до конца излучения сигнала (базовой станцией). Таким образом, вычисляется время распространения СП и посылается команда АС на подстройку переизлученной СП, а вместе с ней и всех излучаемых сигналов.

Отсюда вытекает еще одно условие для формирования СП: ее период $T_{СП} = 26.67$ мс должен быть во много раз больше максимального времени распространения t сигнала от БС к АС и обратно (когда АС находится на границе самой большой соты в системе). При радиусе соты $R_0 = 25$ км это условие выполняется:

$$t = 2 \cdot \frac{R_0}{C} = 2 \cdot \frac{25 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^8} = 0.166 \text{ мс} \ll T_{СП} = 26.67 \text{ мс}$$

Кодирование сигнала осуществляется сверточным кодером с кодовой скоростью $R = \frac{1}{3}$, в результате скорость в информационном канале увеличивается до 28.8 кбит/с (см. табл. 5.4). Другое отличие состоит в том, что мобильная станция не излучает пилот-сигнал. Поэтому базовые станции CDMA осуществляют некогерентную обработку сигналов, а помехоустойчивость обеспечивается в основном за счет пространственного разнесения.

В кодеках мобильных станций тоже применяются ортогональные коды Уолша, но не для уплотнения каналов (как на базовой станции), а для повышения помехоустойчивости. С этой целью входной поток данных со скоростью 28.8 кбит/с разбивается на пакеты по 6 бит, и каждому из них однозначно ставится в соответствие одна из 64 последовательностей Уолша. В итоге скорость кодирования потока на входе модулятора возрастает до 307.2 кбит/с.

Все мобильные станции в сети используют один и тот же длинный код, но с разными циклическими сдвигами. *Величина сдвига длинного кода является адресным признаком, по которому базовая станция различает абонентов при приеме сигнала.*

Число абонентов в системе CDMA зависит от уровня взаимных помех. Согласованные фильтры базовых станций весьма чувствительны к эффекту «ближний – дальний». Чем выше точность управления мощностью, тем ниже уровень взаимных помех. В стандарте IS-95 регулировка мощности мобильной станции осуществляется в динамическом диапазоне 84 дБ с шагом 1 дБ. 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 отдельной обработке лучей позволяет осуществить «мягкий» режим переключения мобильной станции при переходе абонента из одной соты в другую.

4.2.3.3 Формирование канала трафика (прямой канал)

Процесс формирования информационного сигнала на базовой станции поясняется схемой, приведенной на рисунке 4.9.

Речевой сигнал подвергается преобразованию с помощью одного из трех типов вокодеров: 8 кбит/с (QCELP), 13.25 кбит/с (CELP) с постоянной скоростью или 8 кбит/с (EVRS) с переменной скоростью. Речевой кодек работает по алгоритму линейного предсказания с кодовым возбуждением, анализируя по 160 отсчетов дискретизированной речи на интервале длительностью 20 мс. В зависимости от активности речи кодек вырабатывает различные количества бит (172, 80, 40 или 16) на интервале 20 мс, формируя таким образом поток данных с переменной скоростью (8.6; 4.0; 2.0; 0.8 кбит/с). При этом низшая из четырех возможных скоростей используется, как правило, в паузах речи. Далее к этим битам добавляются служебные биты, и цифровая последовательность с переменной скоростью поступает на устройство блочного помехоустойчивого кодирования. После блочного кодирования на каждом интервале 20 мс добавляются 8 «хвостовых» бит. В результате цифровая последовательность приобретает структуру с переменной скоростью 9.6; 4.8; 2.4; 1.2 кбит/с.

Закодированная последовательность поступает на вход сверточного кодера со скоростью кодирования $r = \frac{1}{2}$ и длиной кодового ограничения $k = 9$. При входной скорости 9.6 кбит/с выходная скорость равна 19.2 кбит/с. При входных скоростях, меньших максимальной, выходные биты повторяются таким образом, чтобы на интервале 20 мс всегда было 384 бита, формирующих равномерный поток со скоростью 19.2 кбит/с, независимо от скорости входного потока.

Для повышения устойчивости к замираниям предусмотрено применение блочного перемежения. Процесс перемежения бит осуществляется в пределах каждого блока длительностью 20 мс.

Для шифрования информации применяется процедура скремблирования. Скремблирование информационной последовательности производится путем побитного суммирования по модулю 2 с ПСП с периодом $2^{42} - 1$ и скоростью 1.2288 Мсимв/с (длинный код).

Длинный код с такой частотой 1.2288 Мсимв/с преобразуется в последовательность с частотой 19.2 кбит/с путем удержания первого символа каждого сегмента, состоящего из 64 символов длинного кода. Таким образом, в устройстве, называемым дециматором, формируется цифровая последовательность, реализующая скремблирование информационной последовательности.

Каждый кодовый канал, формируемый на линии «вниз», модулируется одной из 64 ортогональных функций Уолша, генерируемых с фиксированной скоростью 1.2288 Мсимв/с. Модулирующая функция Уолша W_i придает кодовому каналу *адресный признак*, поэтому кодовые каналы нумеруются в соответствии с номером модулирующей функции.

Использование речевого кодека с переменным набором скоростей позволяет существенно уменьшить помеху, создаваемую абонентам соседних БС за счет *снижения средней мощности передаваемых сигналов*. Когда излучается сигнал, соответствующий пониженным скоростям работы речевого кодека, его мощность может быть снижена прямо пропорционально величине снижения скорости.

В этом случае поддерживается постоянная энергия, приходящая на каждый бит передаваемой информации и постоянная вероятность ошибки. Такой алгоритм реализуется путем включения на выходе модулятора Уолша аттенюатора с измененной величиной затухания (на схеме не показан).

Цифровая последовательность модулирована парой псевдослучайных последовательностей – синфазной $I(t)$ и квадратурной $Q(t)$ длиной $2^{15} = 32768$ символов (короткие последовательности). Скорость следования символов этих последовательностей равна 1.2288 Мбит/с.

Так как все базовые станции используют идентичное распределение по каналам методом Уолша, их сигналы коррелировали бы между собой, что не желательно. Модуляция синфазной и квадратурной составляющих позволяет «зашифровать» сигнал. Таким образом, короткий код можно представить в качестве «адреса» базовой станции. Использование этого кода требует наличие двух ПСП (в синфазном и квадратурном каналах). Каждая базовая станция для определения своего местоположения применяет особую *модификацию (сдвиг)* кодов I и Q , состоящих из 64 элементарных сигналов. Таким образом, использование данных кодов позволяет получить 512 уникальных адресов ($32768/64=512$).

На рисунке 4.10 показан пример такого расширения сигнала. Благодаря квадратурному расширению возможно использование аналогичных кодов Уолша в различных сотах (секторах соты).

Описанная процедура носит название *квадратурного расширения сигнала*.

4.2.3.4 Формирование канала трафика (обратный канал)

Схема формирования обратного канала трафика приведена на рисунке 4.12. Процесс формирования сигнала для его передачи по радиолинии имеет следующий алгоритм. Речевой сигнал подвергается преобразованию с помощью одного из трех типов вокодеров: 8 кбит/с (QCELP), 13.25 кбит/с (CELP) с постоянной скоростью или 8 кбит/с с переменной скоростью. В зависимости от активности речи речевой кодек вырабатывает 172, 80, 40 или 16 бит на интервале 20 мс. Блочный кодер аналогичен блочному кодеру в прямом канале.

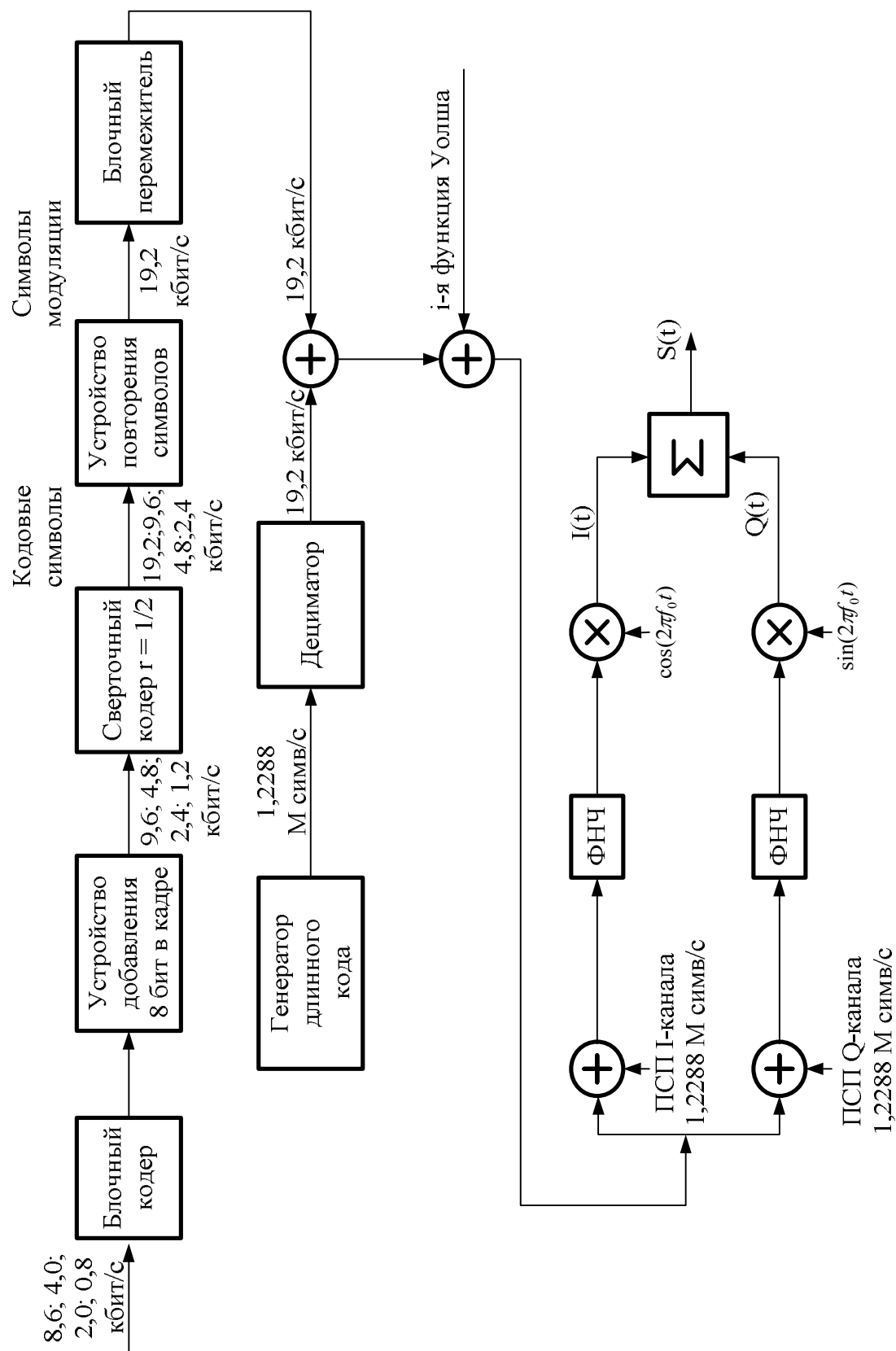


Рисунок 4.9 – Схема формирования информационного сигнала с CDMA на базовой станции

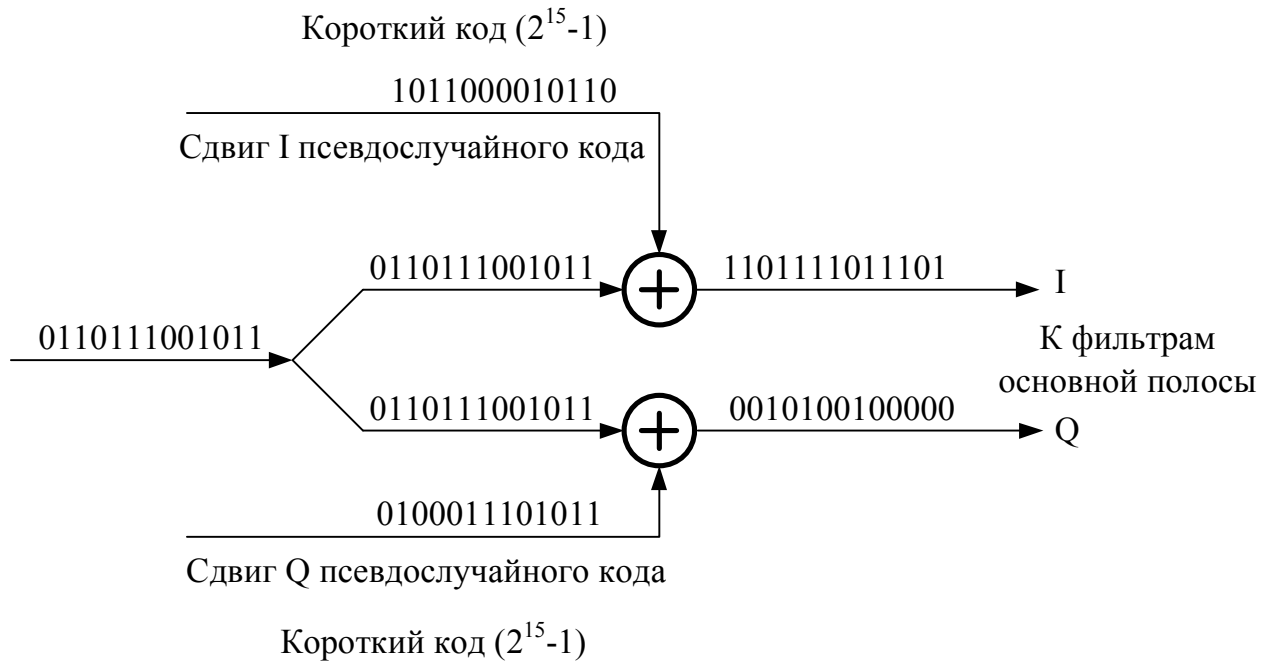


Рисунок 4.10 – Пример квадратурного расширения

На рисунке 4.11 показана упрощенная схема приемника мобильной станции.

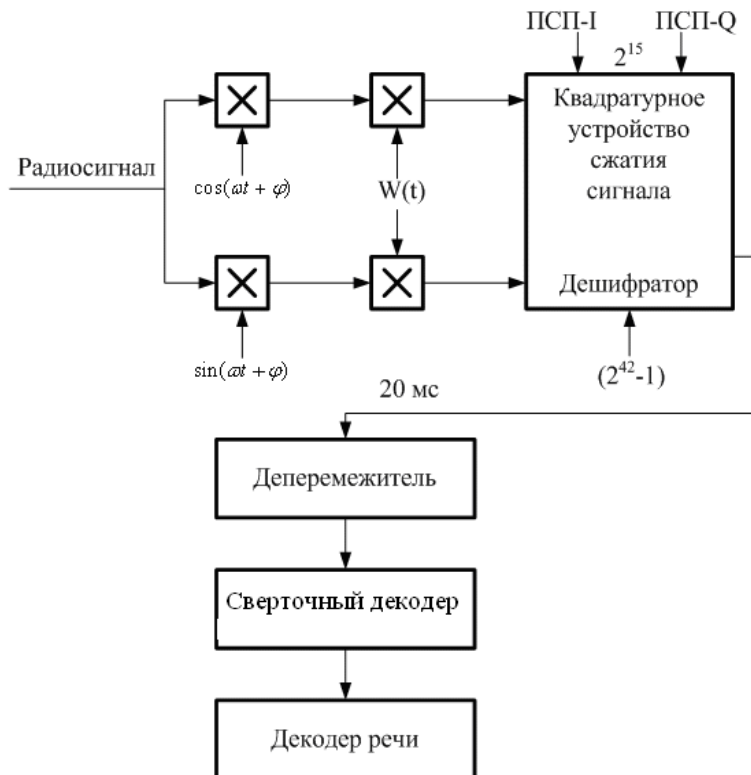


Рисунок 4.11 - Схема приемника мобильной станции

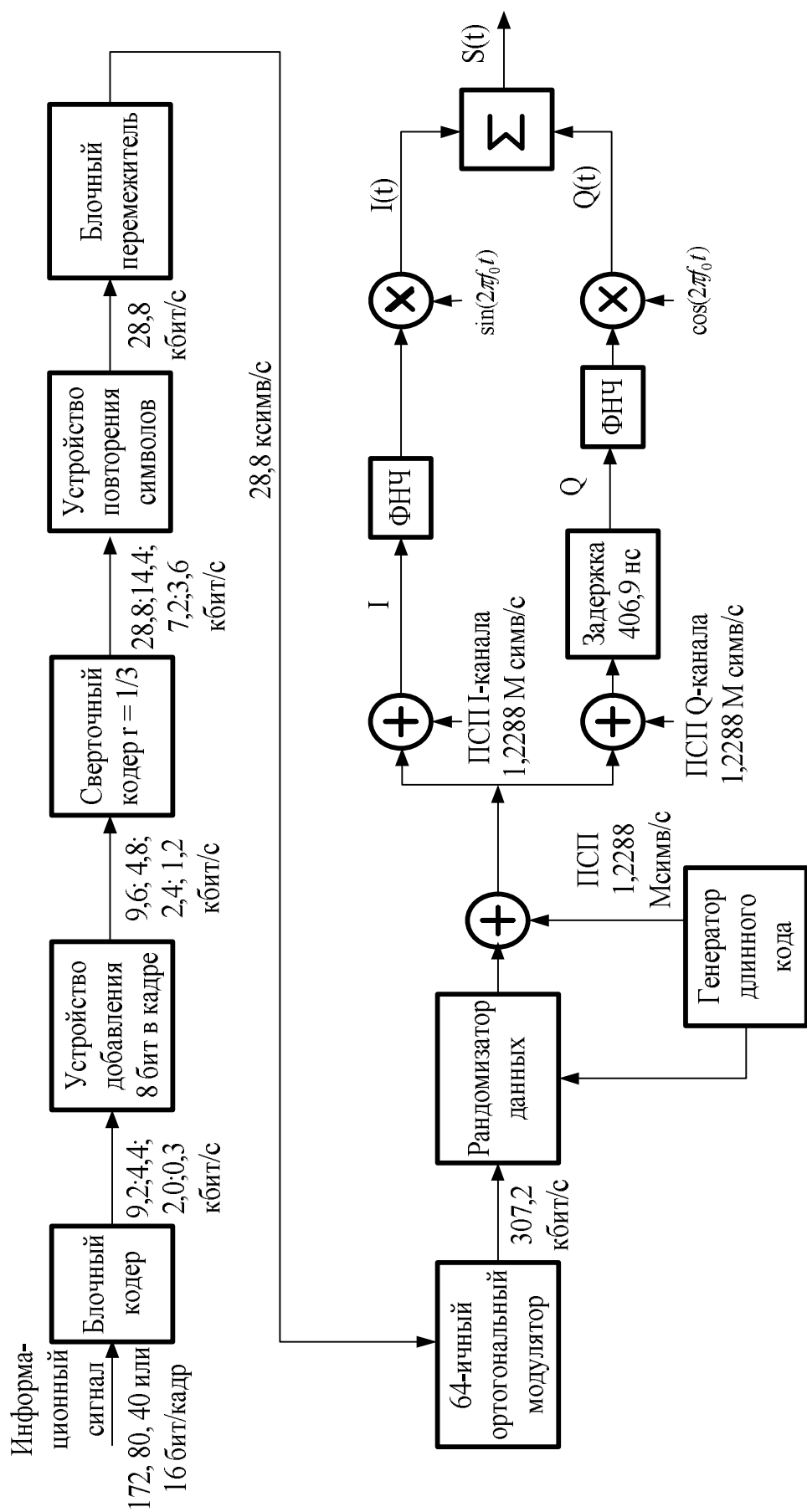


Рисунок 4.12– Схема формирования обратного канала трафика на передаче

Переमेжевание бит производится на интервале 20 мс, на котором размещается 576 бит. Биты столбцы за столбцом записываются в матрицу 32×18 , затем построчно считываются.

Далее цифровой поток, поступающий с выхода перемежителя, разбивается на блоки по 6 бит и каждый такой блок замещается одной из 64 функций Уолша, порядковый номер, который соответствует двоичному числу, выражаемому шестью битами кодируемого блока. Число различных блоков составляет величину $2^6 = 64$ и равно количеству функций Уолша. После 64-ичной модуляции информационный канал имеет скорость 307.2 кбит/с, (на этапе замещения шести бит функцией Уолша скорость увеличивается в 10.6 раза, таким образом, $28.8 \times 10.6 = 307.2$ кбит/с). Т.е. функции Уолша следуют со скоростью, равной $28.2:6 = 4.8$ кбит/с.

Сигнал поступает далее на сумматор по модулю 2, где скремблируется длинным кодом со скоростью 1.2288 Мбит/с (на один символ функции Уолша в прореженном потоке приходится четыре символа ПСП длинного кода ($1228.8/307.2=4$)).

Характеристический полином, используемый для формирования длинного кода ($2^{42} - 1$), имеет вид:

$$P(x) = x^{42} + x^{35} + x^{33} + x^{31} + x^{27} + x^{26} + x^{25} + x^{22} + x^{21} + x^{19} + x^{18} + x^{17} + x^{16} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^3 + x^2 + x^1 + 1$$

На линии «вверх» каналы идентифицируются длинными кодами.

Процедура квадратурной обработки сигнала в каждом канале аналогична линии «вниз» за исключением того, что для всех 64 каналов используется одна и та же пара квадратурных последовательностей с нулевым сдвигом, задержанная на $\frac{1}{2}$ длительности одного символа.

Порождающие полиномы, необходимые для формирования квадратурных ПСП, можно выразить как:

$$g(x)_I = x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$$

$$g(x)_Q = x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$$

Рассмотрим более подробно режимы работы каналов трафика.

4.2.4 Режимы работы каналов трафика

В системе IS-95a стандартизованы два набора скоростей передачи данных. Первый набор (Rate Set 1) включает в себя скорости 1200, 2400, 4800 и 9600 бит/с. Во второй набор (Rate Set 2) входят скорости 1800, 3600, 7200 и 14400 бит/с. Каждая подвижная станция обязана поддерживать первый набор скоростей и может поддерживать второй набор.

В первом наборе скорость потока данных на входе и выходе блокового перемежителя составляет 19,2 кбит/с независимо от скорости входного потока. Это обусловлено применением сверточного кодирования с коэффициентом $R = 1/2$ и длиной кодового ограничения $L = 9$ [17], а также применением побитового повторения к потокам данных со скоростями ниже 9600 бит/с.

В случае первого набора скоростей данные пользователей в 20-мс кадре составляют 172, 80, 40 или 16 бит/кадр. Во втором наборе данные пользователей составляют 267, 125, 55 или 21 бит. При этом скорости входных потоков данных составляют 13350, 6250, 2750 или 1050 бит/с соответственно. К каждому 20-мс кадру добавляется один резервный бит или флаговый бит, биты качества кадра и 8-битовый блок контроля четности. В результате скорости потоков данных возрастают до 14400, 7200, 3600 или 1800 бит/с.

Применение сверточного кодирования с длиной кодового ограничения $L=9$ и коэффициентом кодирования $R=1/2$ приводит к удвоению скоростей потоков данных. В потоках со скоростями ниже 28,8 кбит/с для повышения последних до этого значения применяется повторение битов. Чтобы скорость такого потока совпадала с постоянной скоростью 19,2 кбит/с в других типах каналов, использующих первый набор скоростей, выполняется выкалывание двух из каждых шести битов входного потока. Остальные структурные блоки передатчика для канала трафика при обоих наборах скоростей идентичны.

Исключение представляет канал синхронизации. Поскольку скорость потока данных в нем после повторения символов и перемежения составляет 4800 бит/с. Данные из каналов пейджинга и трафика прибавляются по модулю 2 к выходной псевдослучайной последовательности генератора, создающего последовательность длиной $2^{42} - 1$ (длинный код) со скоростью 19200 бит/с, используя маску отдельного пользователя или пейджингового канала. Цель этой операции состоит в индивидуализации отдельного пользователя и обеспечении конфиденциальности передачи. Каждый бит полученного 19,2 кбит/с потока данных представляется целым периодом последовательности Уолша длиной 64 символа в прямом или логически инвертированном виде в зависимости от значения бита данных. В результате получаются сигналы с расширенным спектром и скоростью потока данных $19200 \times 64 = 1,2288$ Мбит/с. На рисунке 4.13 показаны элементы тракта передатчика для первого и второго набора скоростей.

Каналы трафика используются для передачи речи или данных пользователя (*первичный трафик*), данных (*вторичный трафик*) и информации сигнализации. Поскольку по одному каналу трафика информация может передаваться со скоростью до 9600 бит/с (RS1) или 14400 бит/с (RS2), то первоначальный вариант системы IS-95 был существенно переработан, что позволило достичь более высоких скоростей передачи данных. Стало возможным использовать в одном соединении более одного канала. Поэтому каналы трафика, задействованные в соединении, разделяют на основной кодовый канал и дополнительные кодовые каналы. Соединению может быть выделено до семи дополнительных кодовых каналов, которые работают всегда на самой большой скорости. Таким об-

разом, при использовании RS2 максимальная скорость передачи данных составляет $8 \times 14,4 = 115,2$ кбит/с.

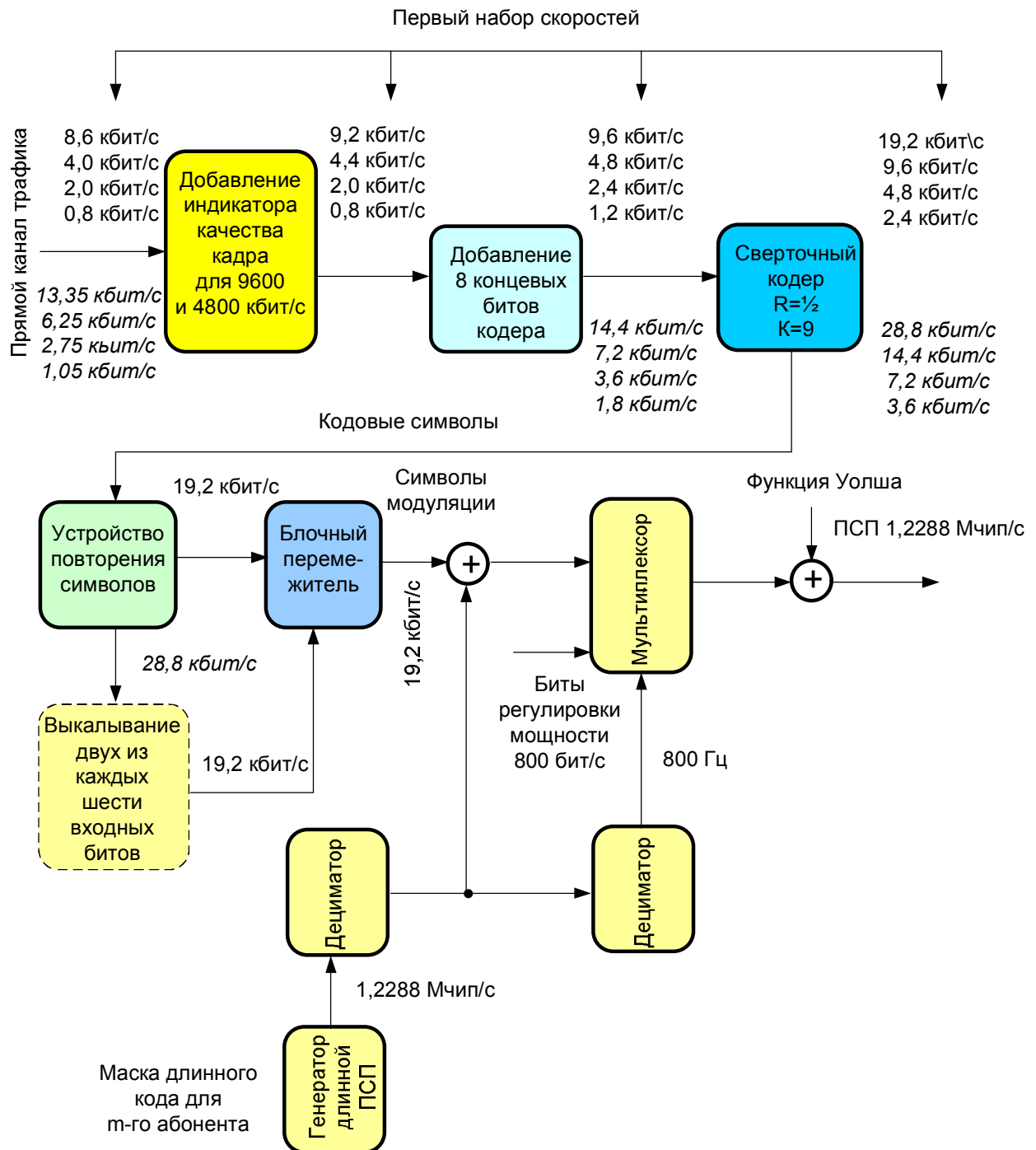


Рисунок 4.13 – Фрагмент структуры канала трафика при различных наборах скоростей передачи потоков данных

Пользовательские данные передаются в виду 20-мс кадров. Структура кадра показана на рисунке 4.14.

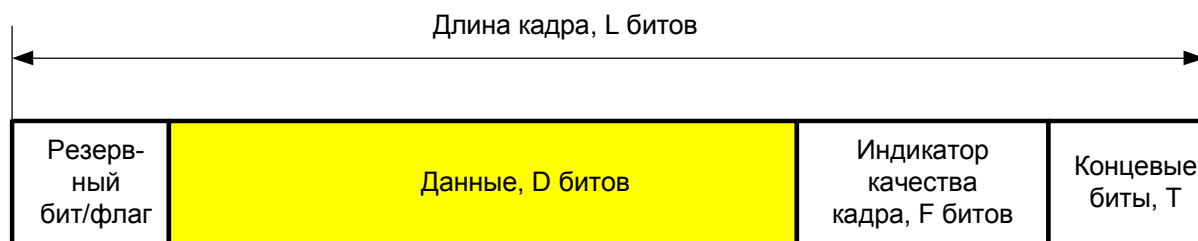


Рисунок 4.14 – Структура кадра

Длины конкретных полей зависят от скорости передачи данных и приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Параметры кадров прямых каналов передачи данных

Скорость передачи данных, бит/с	Длина кадра, L битов	Значение бита флага/резерва	Биты данных, D битов	Индикатор качества кадра, F битов	Оконечные биты, T битов
9600	192	0	172	12	8
4800	96	0	80	8	8
2400	48	0	40	0	8
1200	24	0	16	0	8
14400	288	1	267	12	8
7200	144	1	125	10	8
3600	72	1	55	8	8
1800	36	1	21	6	8

Индикатор качества кадра содержит CRC-биты, рассчитанные на основании информационных битов кадра. В кадр могут входить биты первичного, вторичного или сигнального трафика – как в отдельности, так и в виде смеси.

4.2.5 Передача данных по восходящей линии связи

Передача данных от подвижной станции к базовой существенно отличается от передачи данных в противоположном направлении. В передатчике подвижной станции (рисунок 4.8) имеются две параллельные ветви, реализующие *канал доступа и каналы восходящего трафика*. Отметим, что, как и при передаче по нисходящей линии, помимо *основного кодового канала трафика*, может использоваться до семи дополнительных кодовых каналов. Последовательность

функциональных блоков для одного дополнительного канала приведена на рисунке 4.15.

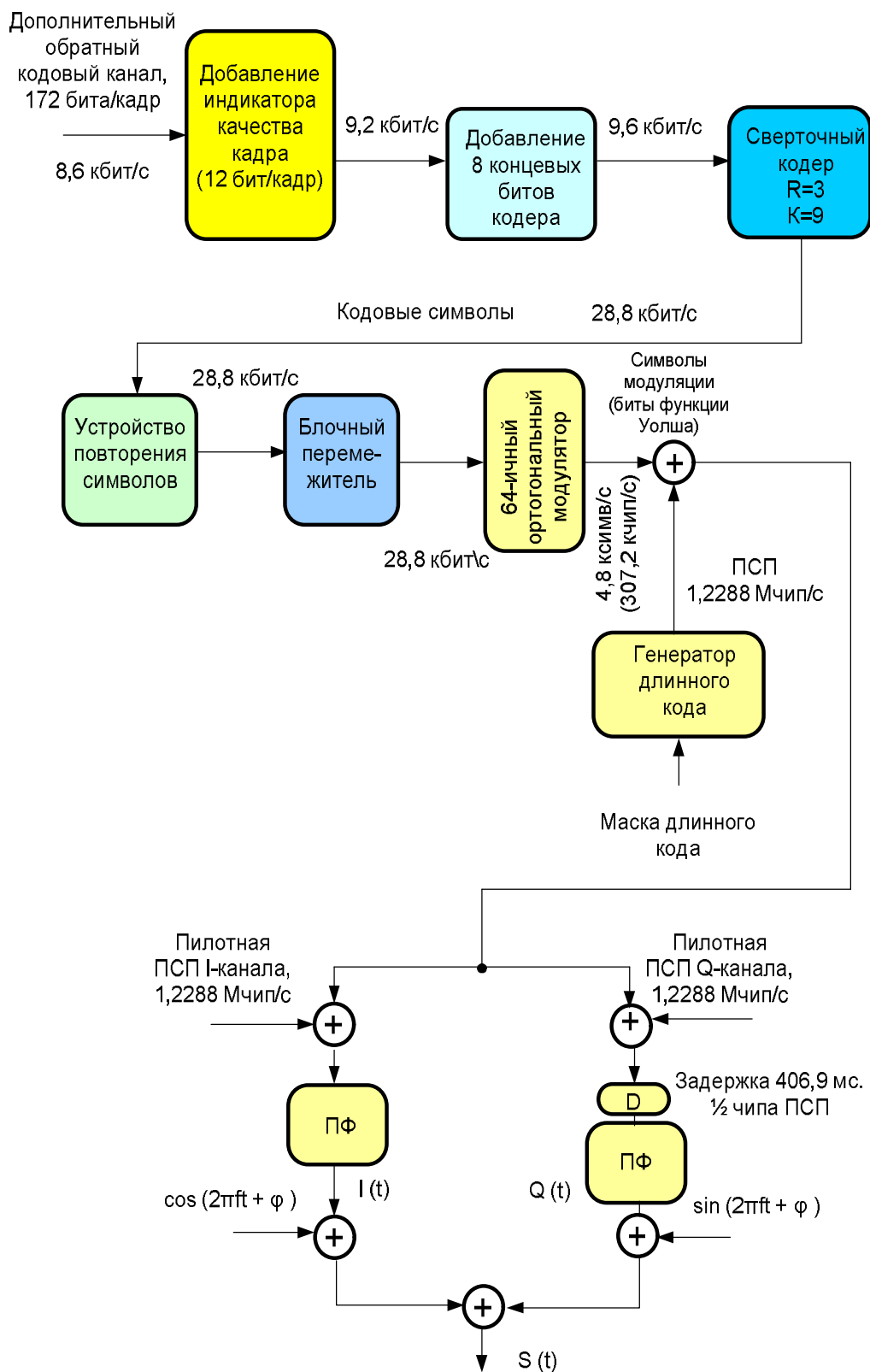


Рисунок 4.15 – Элементы дополнительного кодового канала в мобильной станции

Одна и та же короткая ПСП длиной 32768 чипов используется при передаче как по восходящей, так и по нисходящей линиям. Все подвижные станции в одной соте работают с одним и тем же временным сдвигом ПСП. Сигналы от разных подвижных станций различаются благодаря применению длинной ПСП, генерируемой со скоростью 1, 2288 Мчип/с с использованием маски, уникальной для каждой подвижной станции. Суммирование по модулю 2 информационной и расширяющей последовательности повышает конфиденциальность передачи.

Двоичная последовательность, характеризующая сигнал, кодируется сверточным кодом $R = 1/3$ и длиной кодового ограничения $L=9$. Кодированная последовательность подвергается блоковому перемежению с глубиной 20 мс. Результирующая выходная последовательность имеет скорость 28,8 кбит/с. Она группируется в 6-ти битовые блоки, которые составляют адрес одной из 64 взаимно ортогональных последовательностей Уолша. В результате получается поток последовательностей Уолша со скоростью 307,2 кбит/с. Затем информационная последовательность направляется в рандомизатор пакетов данных. Работа этого блока зависит от текущей скорости потока данных, генерируемого речевым кодером. Если активность пользователя низка и речевой генерирует поток данных со скоростью менее 9600 бит/с, то информационные биты повторяются и рандомизатор пакетов выбрасывает некоторые из них псевдослучайным образом. Это позволяет минимизировать мощность генерируемого сигнала. Полученная последовательность рассеивается при помощи коротких ПСП PNI и PNQ. После преобразования двоичной последовательности в форму биполярных импульсов, сигнал направляется в квадратурную и синфазную ветви OQPSK – модулятора [7].

OQPSK – модуляция позволяет более эффективно использовать усилитель мощности подвижной станции [13, 24].

Схему, аналогичную изображенной на рисунке 4.15, можно построить и для обратного канала передачи данных со вторым набором скоростей RS2. В этом случае вместо кода с коэффициентом $R = 1/3$ используется сверточный код с коэффициентом $R = 1/2$, и скорости передачи данных составляют 14,4, 7,2, 3,6 и 1,8 кбит/с.

Помимо обычного первичного трафика (поток речевой информации), в 20-мс кадре может передаваться вторичный трафик (поток данных) или сигнальная информация. Мультиплексирование нескольких потоков может осуществляться двумя различными способами. В режиме *blank-and-burst* сигнальная информация замещает первичные данные. В режиме *dim-and-burst* и сигнальный/вторичный трафики размещаются в одних и тех же кадрах.

4.2.6 Усовершенствованная версия системы IS-95b для высокоскоростной передачи данных

Как следует из вышеизложенного, скорость передачи данных 115,2 кбит/с в системе IS-95 может быть достигнута без внесения изменений на физическом уровне, путем выделения соединению большого количества последовательно-

стей Уолша. При этом пользователям могут быть предложены новые услуги, такие, как доступ к базам данных, передача файлов и электронная почта [8]. Большинство подобных услуг генерирует пакетный трафик. Поэтому изменения, внесенные в систему IS-95, относятся к обеспечению высокоскоростной передачи пакетов данных. Новая версия получила название IS-95b. При пакетной передаче трафик в прямом и обратном направлении является асимметричным. В прямом направлении на время передачи пакета соединению выделяется основной и до семи дополнительных кодовых каналов (рисунок 4.16).

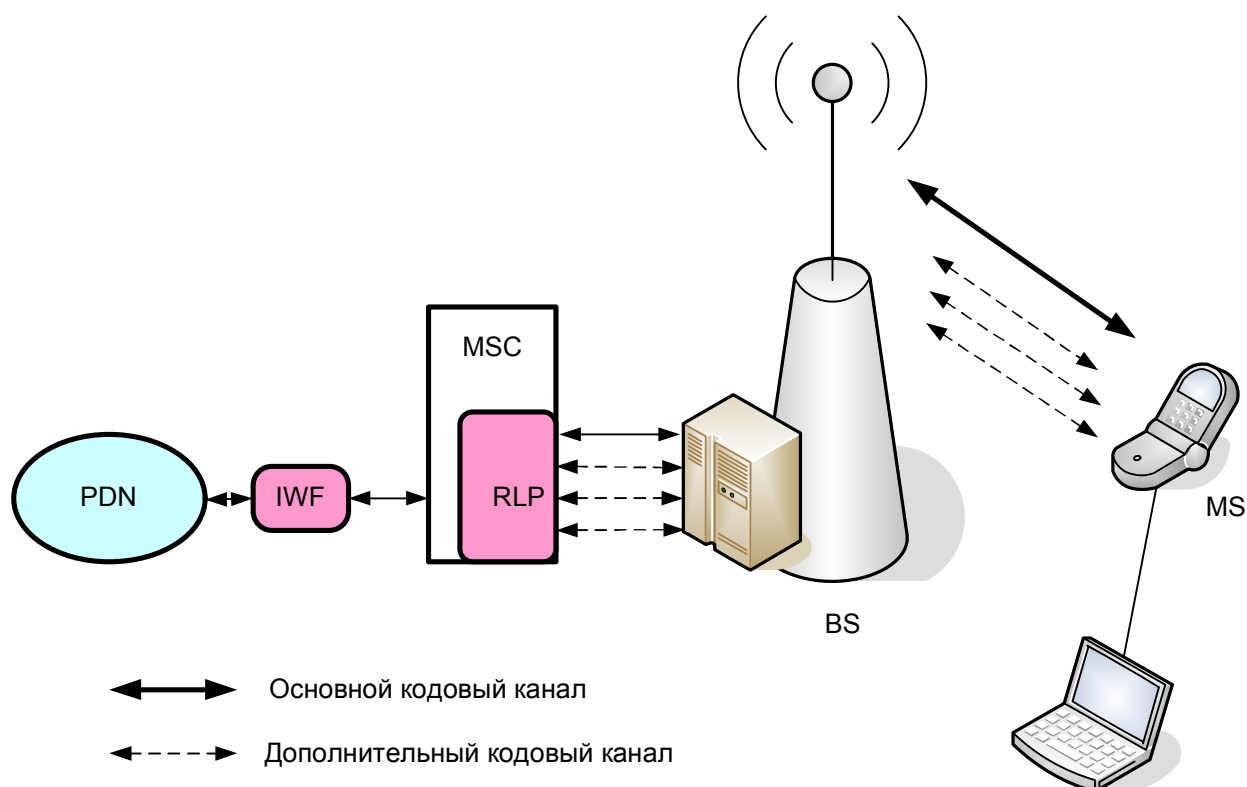


Рисунок 4.16 – Конфигурация системы для высокоскоростной пакетной передачи данных:

IWF - оборудование межсетевого взаимодействия;
 PDN – сеть передачи данных с коммутацией пакетов.

В обратном направлении каждому дополнительному каналу выделяется маска ПСП, отличающаяся циклическим сдвигом. Каждая маска является производной от маски главной последовательности. Каждый выделенный канал является полноскоростным. Регулировка мощности всех дополнительных каналов основана на главном кодовом канале.

Все это позволяет ввести услугу *высокоскоростной пакетной передачи данных (high-speed-data service option)*. Эта услуга реализуется между обору-

дованием межсетевого взаимодействия (*Inter Working Function - IWF*) и подвижным терминалом.

В ходе процедуры согласования подвижная станция указывает свои возможности высокоскоростной передачи данных, выражаемые в количестве параллельных каналов, которые могут быть использованы в восходящей и нисходящей линиях связи. Базовая станция указывает максимальное количество последовательностей Уолша, которое может быть выделено восходящей и нисходящей линиям связи. Во время осуществления пакетной передачи данных подвижная станция может находиться в двух состояниях:

- *в активном*, когда подвижной станции и соединению выделен канал передачи данных, и между подвижной станцией и IWF-блоком реализован протокол двухточечного соединения PPP (*Point-to-point*);
- *в неактивном (дежурное состояние)*, когда соединению не выделено никаких радиочастотных или системных ресурсов, однако за пользователем сохраняется регистрация на услугу пакетной передачи данных и протокол PPP.

Сценарий отправки пакетов в восходящем направлении достаточно подробно рассмотрен в [30].

4.3 Контрольные вопросы

1. Поясните суть технологии множественного доступа CDMA.
2. Поясните назначение основных элементов сети стандарта IS-95.
3. Что означает понятие физического (логического) канала?
4. Поясните структуру прямого канала трафика.
5. Что понимается под чиповой скоростью?
6. Какой метод расширения спектра применяется в стандарте IS-95?
7. С какой целью применяется сверточное кодирование в каналах трафика?
8. Перечислите наборы скоростей передачи данных в стандарте IS-95.
9. Назовите усовершенствования, применяемые в стандарте IS-95b для высокоскоростной передачи данных.

5 Передача данных в сотовых системах третьего поколения

5.1 Концепция IMT – 2000

5.1.1 Мировые тенденции развития рынка телекоммуникаций

В настоящее время мобильная связь является одной из наиболее динамично развивающихся телекоммуникационных отраслей. Прогнозы показывают, что определяющей тенденцией будущего явится слияние мобильной связи с другими технологиями. Начавшийся процесс конвергенции услуг фиксированной и мобильной связи продолжается, охватывая все новые области, включая определение местоположения и мобильную коммерцию. В последние годы аналитики предсказывают еще более бурный рост пользователей услуг мобильной связи. Ожидается, что мобильная связь превзойдет по числу пользователей традиционные проводные телефонные сети (рисунок 5.1).

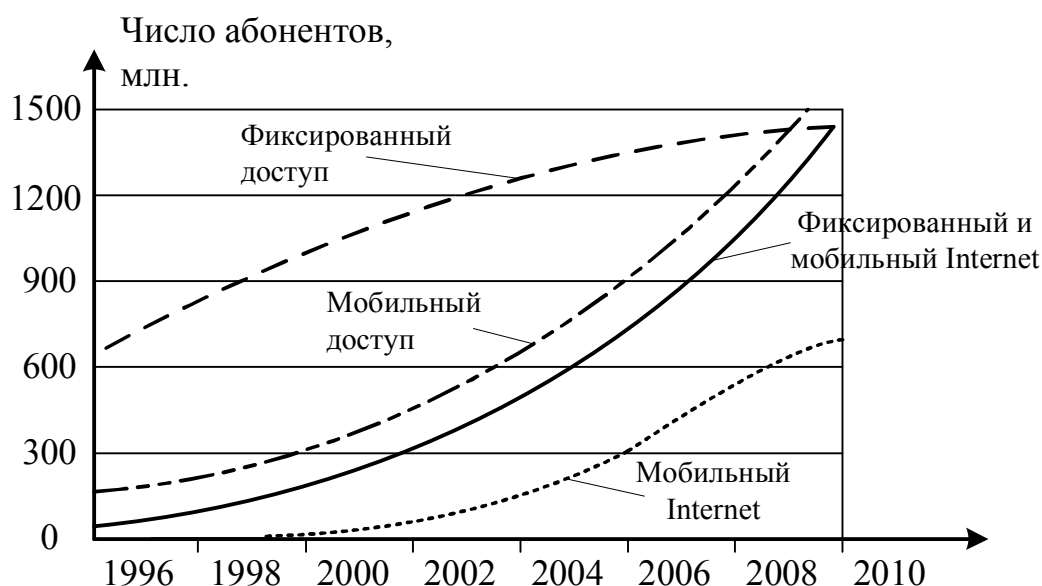


Рисунок 5.1 – Развитие мобильной связи

Стремительный рост популярности Интернет и бурное развитие мобильной связи позволяет говорить в перспективе о слиянии двух технологий. Сегодня спрос на услуги доступа к ресурсам Интернет начинает доминировать над всеми другими. Трафик в сети Интернет удваивается каждые 100 дней. Количество пользователей сети Интернет по всему миру выросло с 62 млн. в 1996 г. до 179 млн. в 1999 г., причем темпы роста продолжают увеличиваться. Несмотря на ряд трудностей, связанных с реализацией высокоскоростного доступа к Интернет с портативного терминала, можно прогнозировать, что со временем эта услуга станет одной из основных в мобильной связи. Согласно отчету, выпущенному Cisco Systems и Yankee Group, переход на IP-сети приведет к 400% увеличению интернет-трафика и уменьшению конкурентоспособности телекоммуникационных компаний, предоставляющих услуги традиционной телефонной связи.

5.1.2 Концептуальные основы сетей мобильной связи третьего поколения

Разработка систем третьего поколения началась задолго до того, как были использованы возможности системы GSM и других систем второго поколения. Существование большого числа разобщенных мобильных сетей на фоне общей тенденции стран к экономической интеграции требовало создание единого стандарта, способного обеспечить абонентам свободу перемещения и сохранение обслуживания в любой сети вне зависимости от места ее развертывания.

Одним из наиболее грандиозных проектов конца XX века является концепция IMT-2000 (рисунок 5.2). В ее основе лежит идея создания нового поколения семейства систем беспроводного доступа, сотовой и спутниковой связи. Ключевые требования, предъявляемые к стандартам семейства IMT-2000: дешевые карманные терминалы, обеспечение глобального роуминга и универсальные решения для сетей разного класса (микросотовых, сотовых и спутниковых).

Термин "связь всегда и везде" играет основополагающую роль в концепции IMT-2000 и подразумевает, что услуги связи должны быть доступны в любом месте на поверхности Земли и в любое время. Глобализация связи создает предпосылки, при которых пользователь может получить доступ ко всему спектру информационных услуг других сетей, распределенных по всей территории земного шара, т.е. независимо от окружающих условий. Согласно концепции UPT (Universal Personal Telecommunication – Универсальная Персональная Связь) каждому жителю Земли должен быть выдан персональный телефонный номер, по которому он мог бы войти в любую сеть связи, в любое время суток и в любом месте, где бы он ни находился.

В основе концепции построения IMT-2000 лежит принцип мобильного доступа ко всем ресурсам единого общемирового информационного пространства. На первом этапе мобильные терминалы получают доступ к фиксированным Web-узлам Интернет. На последующих этапах подвижные узлы радиосетей смогут выполнять функции Web-узлов и серверов Интернет, что обеспечит глобальную связность локальных ресурсов сотовых сетей и доступ к ним с любых типов абонентских устройств.

Международный союз электросвязи (ITU) разработал базовые требования по пропускной способности к системам IMT-2000 [2, 23]:

- до 2,048 Мбит/с при низкой мобильности терминалов (скорость менее 3 км/ч) и локальной зоне покрытия;
- до 384 кбит/с при высокой мобильности терминалов (до 120 км/ч) и широкой зоне покрытия;
- до 64 (144) кбит/с для быстро перемещающихся транспортных средств.

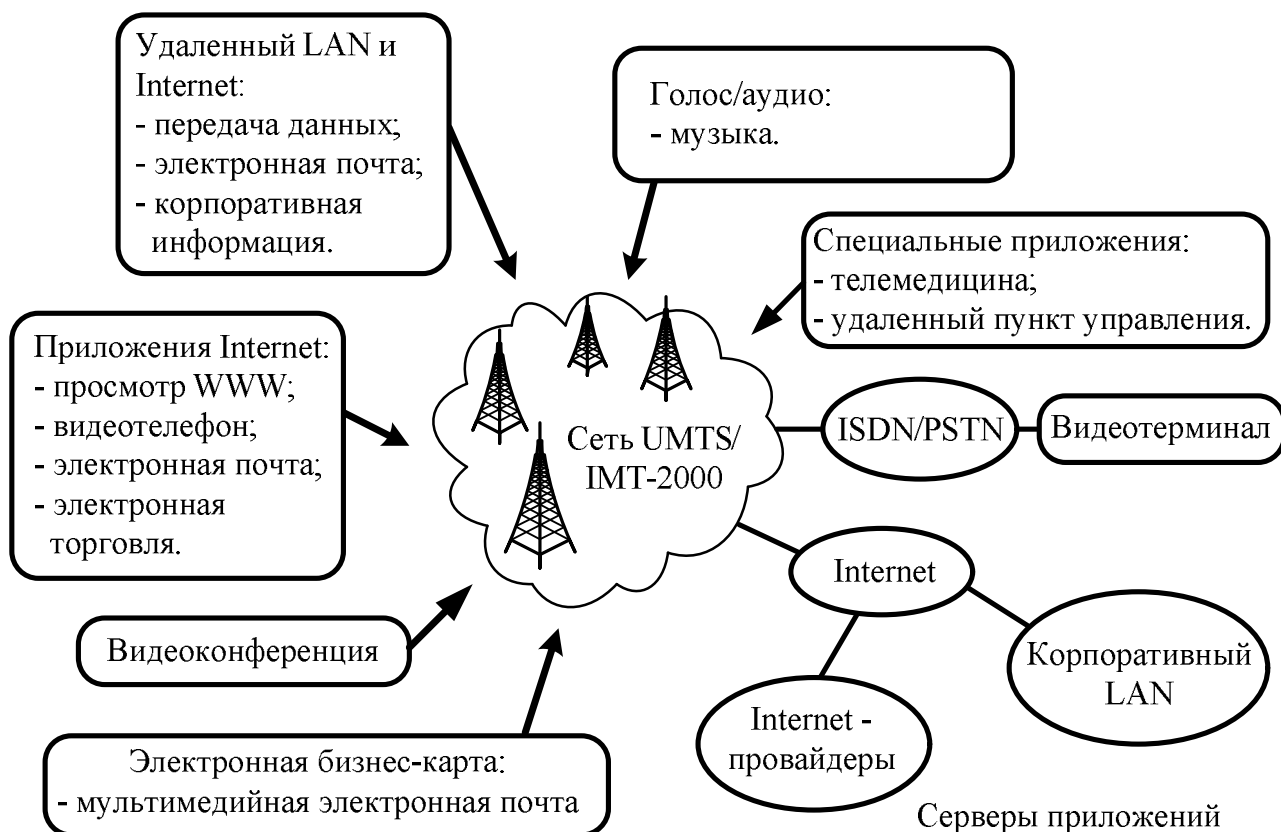


Рисунок 5.2 - Концепция IMT – 2000

Реализацией системы занялись следующие региональные организации:

- ETSI (Европейский институт телекоммуникационных стандартов), который с 1995 года работает над предложениями по *Универсальной системе подвижной связи UMTS*, в которой используется метод множественного доступа WCDMA;

- комитет TTP в США, который координирует работы по развитию систем второго поколения, работающих на территории США (IS-95, IS-136 и GSM 1900). Эти работы привели к появлению системы со многими несущими и методом CDMA на основе IS-95;

- ARIB (*Ассоциация представителей радиопромышленности и бизнеса в Японии*), которая предложила радиоинтерфейс, похожий на UMTS;

- ТТА (*Ассоциация по телекоммуникационным технологиям в Южной Корее*), которая также предложила использовать метод CDMA.

В 1998 году для разработки общего стандарта WCDMA была создана рабочая группа 3GPP (*проект партнерства по системам третьего поколения*). Результатом работы этой группы стал стандарт UMTS. Однако, участники проекта, которые хотели развить систему IS-95, предложили альтернативный стан-

дарт cdma2000. Таким образом, появилась рабочая группа 3GPP2. В действительности соглашение было достигнуто по трем стандартам UMTS:

- UTRA (*UMTS Terrestrial Radio Acces – наземный радиодоступ UMTS*);
- MC CDMA (*многочастотная CDMA*);
- UWC136 (*универсальная беспроводная связь*), в основе которого лежат системы IS-136 и GSM EDGE.

В таблице 5.1 приведен общий перечень предложенных стандартов IMT-2000 (UMTS/WCDMA, cdma2000/IMT-MC, TD-CDMA/TD-SCDMA (собственный стандарт Китая), DECT и UWC-136).

Таблица 5.1 - Стандарты семейства IMT-2000

Семейство стандартов в рамках концепции IMT-2000	Базовая технология	Краткая характеристика
IMT-DS (IMT- Direct Spread)	WCDMA (UMTS) (Wideband Code Division Multiple Access)	Разработан производителями Alcatel, Ericsson, Nokia, Siemens и крупнейшими операторами Европы и Японии. Рассматривается как новый этап развития сетей сотовой связи, но имеет совместимость с GSM сетями и терминалами.
IMT-MC (IMT-Multi Carrier)	cdma 2000 (Code-division multiple access)	Разработан производителями Qualcomm, Motorola и крупнейшими CDMA операторами США. Предполагает строительство сетей 3G путем модернизации оборудования сетей CDMAOne и совместим с терминалами и услугами CDMAOne.
IMT-TC (IMT- Time-Code)	UTRA TDD (UMTS Terrestrial Radio Access Time Division Duplex) TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access)	Разработан компанией Siemens и китайскими производителями одним из последних. Лоббируется правительством Китая как стандарт 3G для Китая. Пока нигде не внедрен. Возможно, получит развитие благодаря китайскому варианту.
IMT-SC (IMT- Single Carrier)	UWC-136 TDMA (Universal Wireless Communications)	Разработан для внедрения 3G на базе сетей 2G стандарта D-AMPS. В связи с закрытием D-AMPS во всем мире не представляет практического интереса. Нигде не используется.

Продолжение таблицы 5.1

IMT-FT (IMT -Frequency Time)	MC-TDMA (Multi-Carrier TDMA)	Дальнейшее развитие DECT систем. Предназначен для обеспечения высоко скоростного доступа до 3,4 Мбит/с в микросотовых системах. В связи с небольшой популярностью DECT как публичных сотовых сетей, практического применения не получил.
------------------------------	------------------------------	--

В настоящее время развиваются две ветви технологий 3G: WCDMA и cdma 2000.

5.1.3 Пути развития сетей 3-го поколения

В рамках концепции IMT-2000 допустимы две стратегии перехода к 3G-системам: постепенное (эволюционное) и моментальное (революционное). Стратегии перехода к сетям 3G приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Стратегии перехода к сетям 3G

Определяющий фактор	Эволюционный подход	Революционный подход
Метод использования частотного ресурса	Работа в старых диапазонах	Освоение новых диапазонов
Принцип предоставления услуг	Постепенно расширяемый ассортимент услуг	Новые услуги с начала разворачивания
Пропускная способность	Постепенно наращиваемая	Изначально высокая
Стратегия создания сетевой инфраструктуры	Постепенный переход от 2G к 3G по мере появления спроса на услуги	Создание новых районов («островков») с полным набором услуг
Технологический уровень	Новые технологии в отдельных элементах	Все технологии – новейшие
Архитектура сети	Максимальное использование существующей инфраструктуры	Новая
Коммерческий риск	Низкий	Высокий
Состав операторов	В основном те же, что и в 2G	Операторы, купившие лицензию на услуги 3G
Глобальный роуминг	С ограничениями	Без ограничений
Капитальные затраты	Незначительные	Значительные

Революционный подход предполагает внедрение всех новейших технологий и новых интерфейсов, однако предусматривает полную замену существующего оборудования и программного обеспечения, что сопряжено с большими капитальными затратами и определенным коммерческим риском.

Эволюционное внедрение требует меньших капитальных затрат и предполагает плавную замену оборудования в зависимости от уровня спроса на конкретные виды услуг. Такой подход позволяет максимально использовать существенную инфраструктуру сети связи, внедряя новые сетевые элементы в процессе последовательной модификации.

На рисунке 5.3 приведена эволюция систем подвижной связи второго поколения в системы третьего поколения.

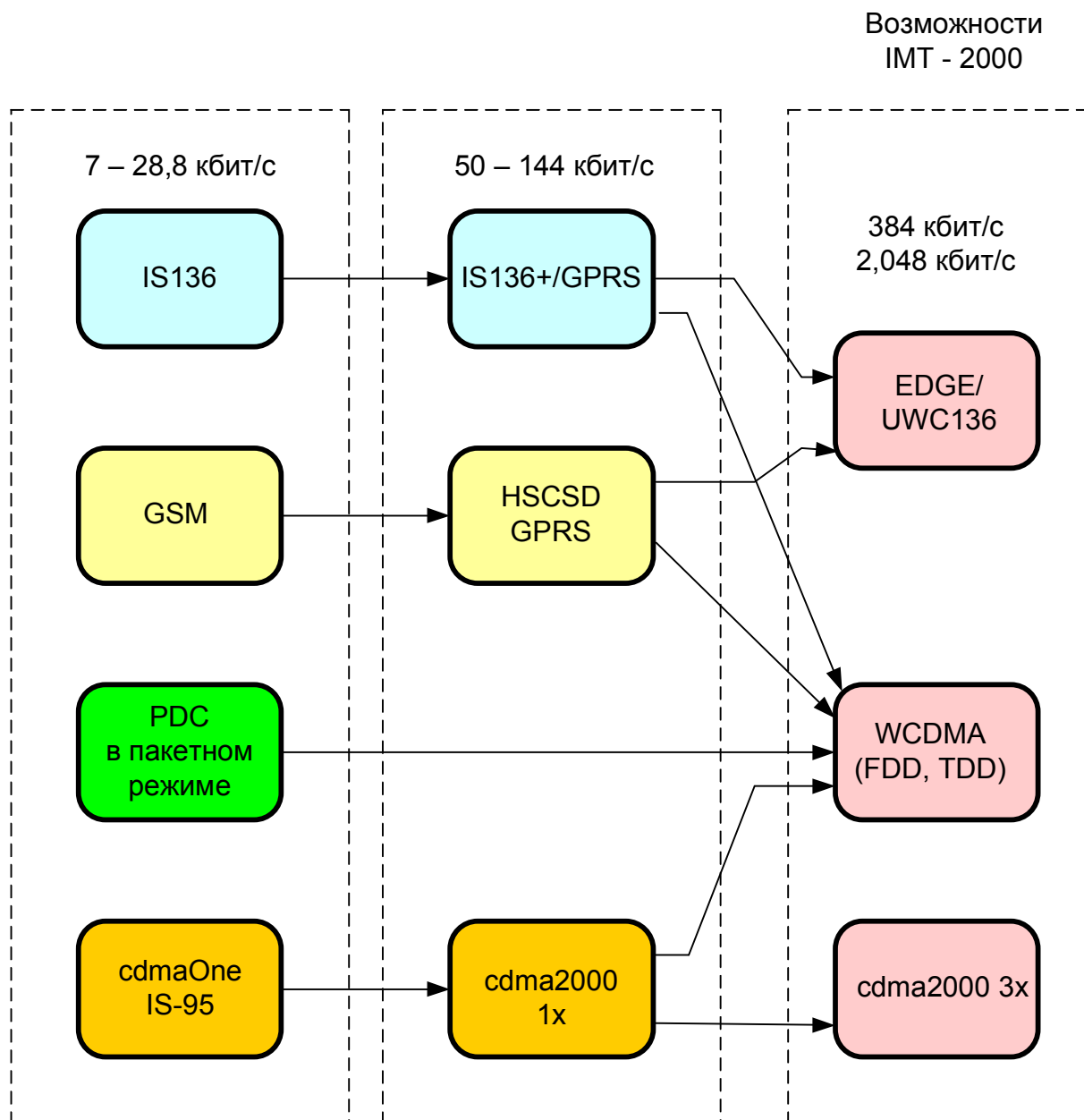


Рисунок 5.3 – Эволюция систем подвижной связи второго поколения

5.1.4 Требования по пропускной способности канала связи при предоставлении типовых видов услуг на основе передачи данных для систем 3G

Перечень типовых видов услуг и требуемой пропускной способности для систем 3G приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Требования по пропускной способности канала связи при предоставлении типовых видов услуг на основе передачи данных

Типовые виды услуг	Требуемая пропускная способность канала связи, кбит/с
VoIP	4–64
Видеоконференции	32–2000
Видеонаблюдение	32–384
Видеотелефон	32–384
Данные большого объема (видеоданные, аудиоданные)	> 1 Мбит/с
Загрузка мультимедиа в одноранговых сетях	> 500
Интерактивные игры	50–85
Мобильное телевидение	300–600
Обмен мгновенными сообщениями	> 250 байт
Потоковое аудио и голос	64–256 кбит/с
Потоковые видеоклипы	32–384 кбит/с
Просмотр веб-страниц	> 500 кбит/с
Электронная почта (с приложенными файлами)	> 500 кбит/с

Технические возможности внедряемых в России систем сотовой подвижной связи поколения 3G позволяют операторским компаниям в полной мере предоставлять услуги. Растущий спрос на услуги сети Интернет, активное внедрение сетей сотовой подвижной связи поколения 3G стимулируют развитие услуг мобильной передачи данных. По прогнозам большинства участников рынка 3G,

наиболее высокими темпами будет развиваться мобильный Интернет, который в ближайшие несколько лет составит основу роста выручки от дополнительных сервисов. Далее, по мере насыщения рынка, на данную услугу будут накладываться различные контентные приложения.

Перечень перспективных услуг в сетях 3G приведен на рисунке 5.4.

Анализ заявлений сотовых операторов и контентпровайдеров позволяет выделить следующие основные направления развития рынка услуг 3G в России:

- реализация платформы по торговле мобильным контентом на базе собственных порталов;
- мобильная реклама;
- расширение зоны национального и международного 3G-роуминга;
- внедрение новых видов контент-услуг (мобильные платежи, LBS-услуги, мобильные социальные сети и др.).

Внедрение сетей сотовой подвижной связи поколения 3G является стратегическим направлением развития операторских компаний сотовой подвижной связи, которое позволяет кардинально увеличить емкость сети, предоставить новые сервисы и улучшить качество услуг.

Таким образом, концепция систем 3-го поколения нацелена на создание условий для предоставления услуг мультимедиа, включая высокоскоростную передачу информации, видео и речи, факсимильных сообщений и данных любому абоненту с помощью мобильного терминала, имеющего единый номер. Стоимость услуги должна быть минимальна при приемлемом качестве и уровне безопасности. Главная цель разработки систем 3-го поколения — удовлетворение потребности массового рынка в персональной связи, и ее достижение будет зависеть как от тарифов для сетей общего пользования, так и от стоимости абонентского терминала.

Рассмотрим системы третьего поколения UMTS и cdma2000.

5.2 Система третьего поколения UMTS

5.2.1 Общие сведения

Основная задача системы UMTS – реализация интегрированной цифровой беспроводной связи со скоростями передачи данных до 2 Мбит/с. В таблице 5.4 приведены диапазоны частот, выделенные системе UMTS [30]. К системе UMTS предъявляются те же требования, что и к IMT-2000:

- возможность работы при различных параметрах среды;
- дуплексная передача данных. Спектр, выделенный для UMTS, состоит из двух парных и двух непарных диапазонов. Это подразумевает использование дуплексной передачи данных с частотным разделением (FDD) в парных диапазонах и передачи данных с временным разделением (TDD) в непарных диапазонах;



Рисунок 5.4 – Перспективные услуги 3G

- широкий спектр услуг;
- взаимодействие с фиксированными сетями связи.

Таблица 5.4 – Спектр, выделенный системе UMTS

Частота, МГц	Ширина спектра, МГц	Назначение
1900...1920	20	UMTS (наземный), TDD
1920...1980	60	UMTS (наземный), FDD, UL
1980...2010	30	UMTS (спутниковый), FDD, UL
2010...2025	15	UMTS (наземный), TDD
2110...2170	60	UMTS (наземный), TDD, UL
2170...2200	30	UMTS (спутниковый), FDD, DL

5.2.2 Архитектура сети радиодоступа UMTS

Структура радиосети UMTS показана на рисунке 5.5.

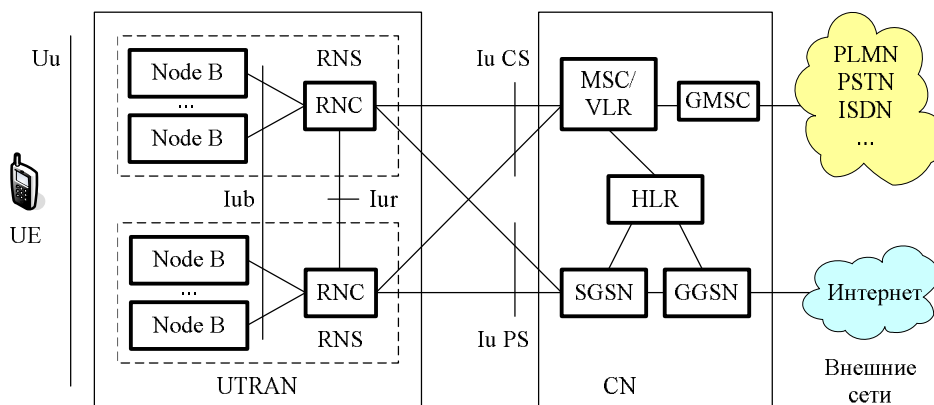


Рисунок 5.5 - Архитектура радиосети UMTS

Система UMTS использует преимущества существующих сетей GSM и GPRS, которые выступают в роли базовой сети в инфраструктуре UMTS.

В основе архитектуры UMTS лежат развернутая GSM и внутренние сети GPRS, а также специально приспособленная Универсальная наземная сеть радиодоступа UTRAN (Universal Terrestrial Access Network). Были определены два метода организации дуплексной передачи, определяющие, каким образом получаемый сигнал отделяется от передаваемого сигнала:

- универсальный наземный радиодоступ/дуплексный режим с разделением времени (UTRA/TDD (Universal Terrestrial Radio Access/Time Division Duplex)). Этот метод основан на двунаправленной передаче при возможности использования различных временных слотов в пределах одной радионесущей для передачи отправляемых и получаемых сигналов;
- универсальный наземный радиодоступ/дуплексный режим с частотным разделением (UTRA/FDD (Universal Terrestrial Radio Access/Frequency Division Duplex)). Этот метод основан на двунаправленной передаче при обеспечении возможности передавать отправляемые и получаемые сигналы по двум отдельным и симметричным полосам радиочастот для двух каналов передачи.

Главное отличие UMTS от сетей GSM/GPRS состоит в интерфейсе беспроводной передачи. Для организации нового метода доступа к радиоинтерфейсу требуется новая сеть беспроводного доступа — UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network). Для работы с UTRAN в опорную сеть требуется внести лишь незначительные изменения — а именно контроллеры сети радиодоступа RNC и новые базовые станции Node B. Дуплекс в WCDMA возможен как по частоте (FDD), так и по времени (TDD).

С функциональной точки зрения, элементы сети объединяются в наземную сеть радиодоступа UTRAN и в базовую сеть (Core Network, CN). Последняя осуществляет переключение и маршрутизацию вызовов, а также подключение к внешним сетям. Кроме того, в состав сети входит оборудование пользователя (UE).

Сеть UTRAN состоит из совокупности радиосетевых подсистем (Radio Network Subsystem, RNS), соединенных с базовой сетью. Подсистема RNS включает контроллер RNC и одну или несколько базовых станций (Node B). Основной функцией Node B является реализация радиоинтерфейса (обработка радиосигнала, модуляция/демодуляция с расширением/сжатием спектра сигнала, кодирование/декодирование и др.), в том числе, выполнение некоторых операции по распределению радиоресурсов сети (управление мощностью излучения, осуществление хэндовера). Базовая станция может поддерживать режимы FDD, TDD или смешанный (dual-mode) режим работы.

Контроллер сети радиодоступа RNC управляет базовыми станциями и взаимодействует с центром коммутации сети MSC/VLR. Основными функциями RNC являются управление распределением радиоканалов, контроль соединений, регулирование их очередности, удаленная динамическая коммутация, а также контроль за распределением абонентской нагрузки. Контроллеры веду-

щих мировых производителей телекоммуникационного оборудования строятся, как правило, на базе АТМ-коммутатора, расширенного блоками управления радиоканалами.

Мобильный центр коммутации сети MSC/VLR является центральным элементом сети. Он может обслуживать большую группу Node B и обеспечивает все виды соединений, в которых нуждается в процессе работы подвижная абонентская станция. MSC/VLR осуществляет обмен внутри сети UMTS, соединяя между собой различные сетевые элементы, в частности, элементы подсистемы RNS. MSC/VLR обеспечивают соединение с другими MSC, в частности, с зональными GMSC и другими службами. Совмещенная база данных перемещения абонентов (VLR) содержит копию списка подключенных услуг связи для гостей абонентов, а также точную информацию о местоположении абонентской станции в рамках обслуживающей системы. Зональный центр коммутации (GMSC) осуществляет коммутацию между сетью UMTS и внешними CS-сетями.

База данных местоположения абонентов HLR представляет собой справочную базу данных о постоянно прописанных в сети абонентах. В ней содержатся опознавательные номера и адреса, а также параметры подлинности абонентов, состав услуг связи, специальная информация о маршрутизации и данные о роуминге абонента.

Сервисный опорный узел SGSN решает задачи идентификации абонента и управления мобильностью, конвертирования протоколов IP-сети в протоколы, используемые Node B и UE, сбора данных об оплате и трафике абонентов и маршрутизации данных (при подключении к другим внешним сетям).

Шлюзовой опорный узел GGSN является интерфейсом между базовой сетью GPRS и внешними сетями, играя роль маршрутизатора подсистем. В случае, если данные адресованы специальным пользователям, осуществляется их проверка и поиск адресата. GGSN осуществляет перераспределение пакетов данных мобильным абонентам и контролирует правильность подсоединения внешних сетей.

Архитектура сети UMTS достаточно гибка и универсальна, чтобы оператор мог создавать нужную ему конфигурацию сети.

В сети UTRAN выделяют четыре основных интерфейса:

Uu - интерфейс между абонентским оборудованием и Node B;

Iub - интерфейс между Node B и контроллерами RNC;

Iu - интерфейс между RNC и базовой сетью;

Iur - интерфейс между контроллерами RNC.

Протоколы интерфейсов Uu и Iu делятся на две структурные части: протоколы плоскости пользователя (транспортные сервисы, обеспечивают передачу данных через слой доступа) и протоколы плоскости управления (обеспечивают управление транспортными службами радиодоступа и соединением между оборудованием пользователя и сетью, включая запросы на обслуживание, управление ресурсами передачи, хэндовер и т.д.). Также существует прозрачный

механизм передачи сообщений уровней, непосредственно не связанных с предоставлением доступа.

Очевидно, что достижение высоких скоростей при ограниченном частотном ресурсе и работе в каналах с замираниями возможно при реализации принципиально новых подходов к построению радиointерфейса.

5.2.3 Радиointерфейс наземного радиодоступа UMTS

Радиointерфейс наземного радиодоступа UMTS был определен рабочей группой 3GPP. Его часто называют WCDMA. WCDMA представляет собой систему множественного доступа с кодовым разделением каналов и прямым расширением спектра (DS-SS), т.е. биты информации пользователя передаются в широкой полосе частот путем умножения исходного потока данных пользователя на последовательности квазислучайных битов (называемых чипами), являющиеся кодами расширения CDMA. Для обеспечения очень высоких скоростей передачи (до 2 Мбит/с) поддерживается использование переменного коэффициента расширения и мультикодовых комбинаций. Пример организации такой структуры показан на рисунке 5.6 [11].

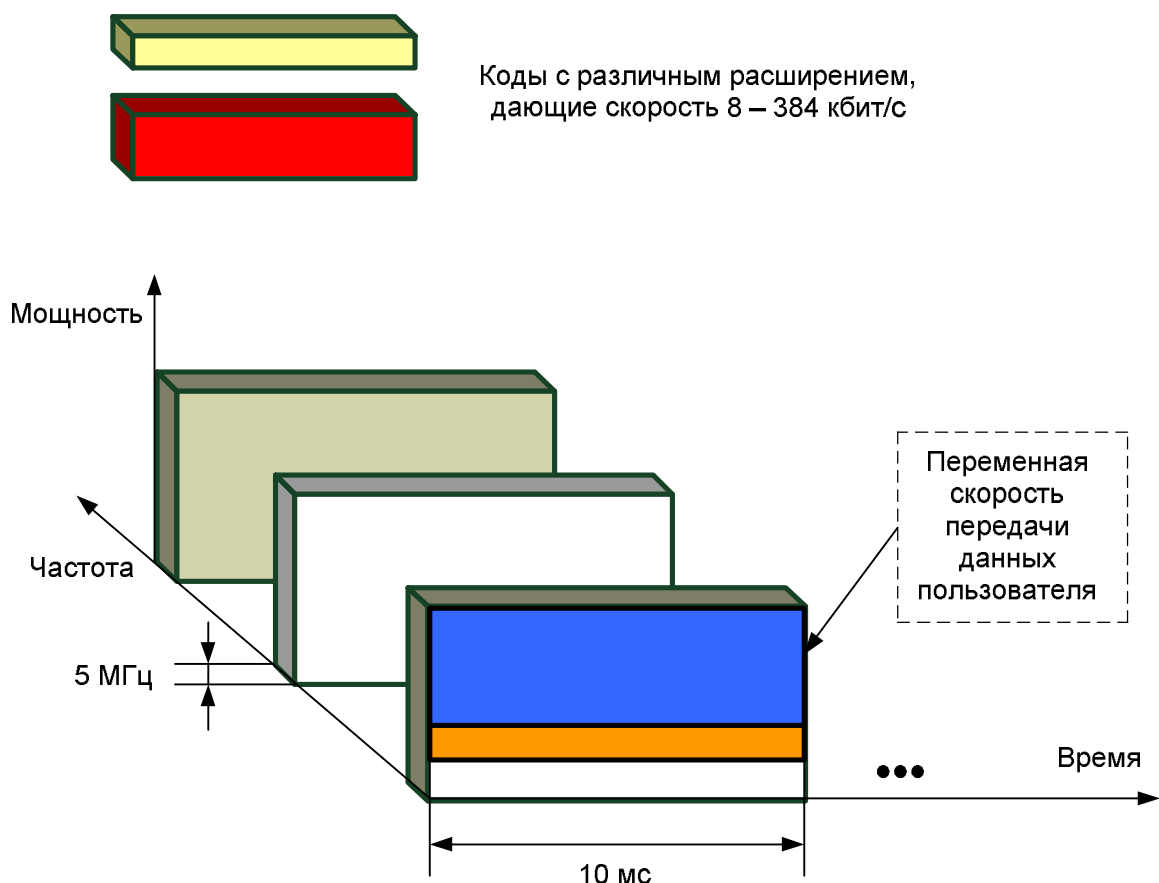


Рисунок 5.6 – Распределение полосы частот в WCDMA во временном частотно-кодовом пространстве

Скорость передачи, равная 3,84 Мчип/с, приводит к занятию полосы приблизительно в 5 МГц. Системы DS-CDMA с шириной полосы около 1 МГц, например, IS-95, обычно называют узкополосными системами CDMA. Присущая системам WCDMA большая ширина полосы на несущей обеспечивает высокие скорости передачи данных пользователя, а также создает определенные преимущества в работе, например в каналах с повышенной многолучевостью. Не нарушая полученной лицензии на работу системы, оператор может иметь несколько таких несущих с полосой 5 МГц для увеличения пропускной способности, возможно, в виде ячеек иерархической структуры.

WCDMA поддерживает самые разные скорости передачи данных пользователя, другими словами, концепция получения ширины полосы по требованию (BoD) достаточно хорошо поддерживается. Каждому пользователю выделяются фреймы длительностью 10 мс, в течение каждого из которых скорость передачи данных пользователя остается постоянной. Однако пропускная способность для передачи данных у пользователя может меняться от фрейма к фрейму. Быстрое выделение пропускной способности для радиосвязи будет обычно управляться сетью для достижения максимальной пропускной способности при передаче пакетированных данных.

WCDMA поддерживает два основных режима работы: частотное разделение дуплексных каналов (FDD) и временное разделение дуплексных каналов (TDD). В режиме FDD для восходящего и нисходящего каналов используются отдельные несущие с частотой 5 МГц, тогда как в режиме TDD только одна несущая 5 МГц используется для восходящего и нисходящего каналов с разделением прием-передача во времени. Восходящий канал - это канал от подвижной станции к базовой, а нисходящий - от базовой станции к подвижной. Режим TDD в значительной мере основан на концепциях режима FDD и был дополнительно введен, чтобы использовать базовую систему WCDMA так же и для непарного (несимметричного) распределения спектра, выделенного ITU для систем IMT-2000.

WCDMA поддерживает работу асинхронных базовых станций, так что в отличие от синхронной системы IS-95 отсутствует необходимость в глобальной привязке ко времени, например к GPS. Развертывание базовых станций внутри помещений и миниатюрных базовых станций (для пикосот) производится легче, когда не требуется получать сигнал GPS.

WCDMA использует когерентный прием для систем WCDMA в восходящем и нисходящем каналах на основе применения пилот-символов или общих пилот-сигналов. Хотя когерентный прием уже используется в нисходящем канале в IS-95, его применение в восходящем канале является новым для систем CDMA общего пользования и приведет к увеличению общей зоны охвата и пропускной способности восходящего канала.

Воздушный интерфейс WCDMA задуман таким образом, что оператор сети может использовать перспективные концепции построения приемников CDMA, например многопользовательский прием и применение интеллектуальных адаптивных антенн как способ повышения пропускной способности и/или зоны охвата. В большинстве систем второго поколения отсутствуют возможно-

сти использования таких концепций построения приемника, и в результате они либо не могут применяться, либо могут применяться лишь с большими ограничениями и дают лишь незначительное улучшение эксплуатационных показателей.

WCDMA предназначена для использования вместе с GSM. Поэтому поддерживаются эстафетные передачи управления (хэндоверы) между GSM и WCDMA для того, чтобы иметь возможность использовать зону охвата GSM для внедрения WCDMA. В таблице 5.5 приведены основные характеристики радиоинтерфейса при различных режимах дуплексной передачи.

Таблица 5.5 – Основные параметры интерфейсов WCDMA

Параметр	UTRA FDD	UTRA TDD
Метод множественного доступа	CDMA	TDMA/CDMA
Метод дуплексной передачи данных	FDD	TDD
Ширина канала	5 МГц	
Чиповая скорость	3,84 Мчип/с	
Длина кадра	10 мс	
Временная структура кадра	15 слотов в кадре	
Способы изменения скорости	Мультикодовый, многослотовый и OVSF*	Мультикодовый и OVSF*
Способ расширения (в нисходящем направлении)	OVSF-последовательности, укороченные последовательности Голда ($2^{18} - 1$) для разделения сот и пользователей	
Способ расширения (в восходящем направлении)	OVSF-последовательности, укороченные последовательности Голда ($2^{25} - 1$) для разделения пользователей	
Коэффициент расширения	4 - 512	1 - 16
Канальное кодирование	Сверточное кодирование ($R=1/2, 1/3, K=9$); турбокодирование	
Перемежение	Межкадровое перемежение (10, 20, 40 и 80 мс)	
Модуляция	QPSK	

Продолжение таблицы 5.5

Форма импульсов	Фильтр с характеристикой в виде корня из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 0,22	
Тип пакетов	-	Пакеты с речевыми данными, пакеты синхронизации и пакеты произвольного доступа

*OVSF – ортогональные коды с переменным коэффициентом расширения, разновидность расширяющих кодов, используемых в UTRA.

5.2.3.1 Режим UTRA FDD

На физическом уровне время в системе UMTS разделено на 10-мс кадры. В свою очередь, каждый кадр разделен на 15 слотов длительностью по 666, 67 мкс. В случае применения режима FDD такое временное деление кадра не является результатом использования метода многостанционного доступа, каким здесь является CDMA.

В режиме UTRA FDD физический канал определяется несущей частотой, используемой расширяющей последовательностью и компонентой сигнала (в восходящей линии связи синфазная и квадратурная составляющие сигнала могут переносить разные физические каналы).

На физическом уровне определены два типа выделенных физических каналов для восходящей и нисходящей линий связи:

- *выделенный физический канал управления (Dedicated Physical Control Channel - DPCCCH);*
- *выделенный физический канал данных (Dedicated Physical Data Channel - DPDCH).*

Каждому соединению назначается один выделенный физический канал управления и до шести выделенных каналов данных. В восходящем направлении двоичный поток канала данных DPDCH направляется на синфазный вход передатчика, а двоичный поток данных канала управления DPCCCH – на квадратурный. Если количество каналов передачи данных больше одного, то все нечетные каналы суммируются, взвешиваются и передаются по синфазной составляющей, а четные каналы суммируются, взвешиваются и передаются по квадратурной составляющей вместе с каналом управления.

В каждом слоте имеется 4 поля (рисунок 5.6), предназначенных для пилотных бит, TFCI, бит управления мощностью передачи (TPC) и бит информации обратной связи (FBI). Пилотные биты используются для оценки канала в приемнике, а биты TPC переносят команды управления мощностью для управления мощностью в нисходящем канале. Биты FBI используются в том случае, если в нисходящем канале применяется разнесение передачи в замкнутом кон-

туре. Для восходящего канала DPSSN имеется всего 6 слотовых структур. Различаются варианты с 0, 1 или 2 бит в качестве бит FBI и те же самые варианты с бит TFCI и без них. Биты пилотные и TPC присутствуют всегда, и их число изменяется таким образом, что слот DPSSN оказывается использованным полностью.

Выгодно вести передачу по одному DPDSN как можно дольше с точки зрения эффективности работы усилителя терминала, так как мультикодовая передача повышает отношение пикового значения к среднему при передаче, что уменьшает эффективность работы усилителя мощности терминала.

Максимальную скорость передачи данных пользователя с использованием одного кода получают исходя из максимальной скорости передачи данных в канале, составляющей 960 Кбит/с без канального кодирования и при коэффициенте расширения спектра 4 [8]. При канальном кодировании используемая на практике максимальная скорость передачи данных пользователя для одного кода составляет 400 – 500 Кбит/с.

Когда требуются более высокие скорости передачи, используются параллельные кодовые каналы. Это позволяет использовать до шести кодов параллельно, увеличивая скорость передачи в канале при передаче данных до 5740 Кбит/с, что позволяет вести передачу данных пользователя со скоростью 2 Мбит/с и даже больше, если скорость кодирования составляет $\frac{1}{2}$. Поэтому можно обеспечить передачу данных пользователя со скоростью 2 Мбит/с даже после повторения передачи. Достижимые скорости передачи данных при различных коэффициентах расширения спектра представлены в таблице 5.6. В приведенных скоростях предполагается использование кодирования со скоростью $\frac{1}{2}$ и в них не включены последние [“хвостовые”] биты кодера или проверочной комбинации кода (CRC). Относительные издержки, обусловленные последними битами и битами CRC, имеют значение только при низких скоростях передачи.

Необходимо, чтобы приемник восходящего канала на базовой станции выполнял следующие функции при приеме - передаче от терминала:

- приемник начинает прием фрейма и осуществляет сжатие DPSSN и буферизацию DPDSN в соответствии с максимальной скоростью передачи, соответствующей наименьшему коэффициенту расширения спектра;
- для каждого слота
 - получает оценки канала от пилотных битов по DPSSN;
 - оценивает SNR от пилотных битов для каждого слота;
 - посылает команду TPC в нисходящем направлении в терминал для управления его мощностью передачи в восходящем канале;
 - декодирует бит TPC в каждом слоте и соответствующим образом регулирует мощность в нисходящем канале этого соединения;

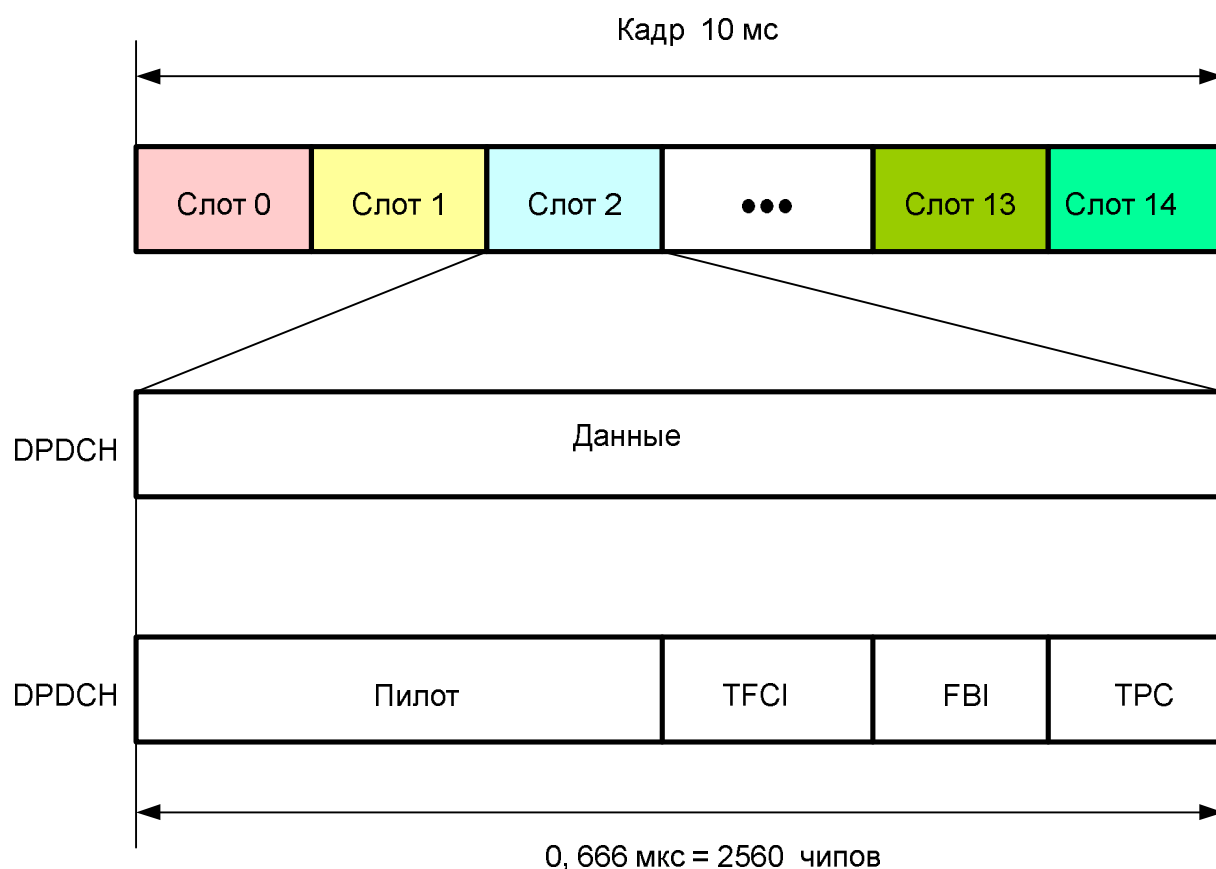


Рисунок 5.6 – Структура восходящего выделенного физического канала

Таблица 5.6 - Скорость передачи данных в восходящем канале DPDCH

Коэффициент расширения спектра в DPDCH	Скорость передачи данных в DPDCH (Кбит/с)	Максимальная скорость передачи данных пользователя при скорости кодирования $\frac{1}{2}$ (приблизительно)
256	15	7,5 Кбит/с
128	30	15 Кбит/с
64	60	30 Кбит/с
32	120	60 Кбит/с
16	240	120 Кбит/с
8	480	240 Кбит/с
4	960	480 Кбит/с
4, с 6 параллельными кодами	5740	2,3 Мбит/с

- для каждого второго или четвертого слота
 - декодирует биты FBI [информации обратной связи], если они имеются, по двум или четырем слотам и регулирует фазы антенн для разнесенного приема, или фазы и амплитуды в зависимости от режима разнесения передачи;
- для каждого фрейма длительностью 10 мс
 - декодирует информацию TFCI из фрейма DPCCN для получения битовой скорости и параметров декодирования канала для DPCCN;
- для интервала времени передачи (TTI, период перемежения) 10, 20, 40 или 80 мс
 - декодирует данные DPDCH.

Оба потока данных рассеиваются двумя взаимно ортогональными *кодами каналообразования*. Они позволяют осуществить 4-256 –кратное расширение спектра сигнала в зависимости от скорости передачи информационной последовательности. Коэффициент расширения равен $256/2^k$, где $k = 0, 1, \dots, 6$. Таким образом, в каждом из 15 слотов 10-мс кадра передается 10×2^k битов. Так как скорости передачи данных в обоих физических каналах могут различаться, то значения средней мощности сигналов синфазной и квадратурной составляющих также могут различаться. Используемое расширение подстраивается под текущую скорость передачи данных в канале данных, что приводит к изменению ширины спектра сигнала. Переменный коэффициент расширения позволяет получить так называемые ортогональные коды с переменным коэффициентом расширения OVSF [25].

Полученная пара потоков данных, подвергнутых расширению кодовыми словами OVSF, может быть представлена в виде комплексного сигнала, действительная часть которого выступает в роли синфазной составляющей, а мнимая – в роли квадратурной. Такой комплексный сигнал подвергается процедуре комплексного скремблирования.

Комплексный поток синфазных и квадратурных импульсов, формируется фильтрами с косинусоидальной характеристикой в степени $1/2$ и размещается в требуемом диапазоне парой ортогональных модуляторов (рисунок 5.7).

Организация нисходящей передачи выделенных каналов отличается от передачи в восходящем направлении. Выделенные каналы данных и управления мультиплексируются, как показано на рисунке 5.8.

В нисходящем канале коэффициенты расширения спектра находятся в пределах от 4 до 512 при некоторых ограничениях на использование коэффициента расширения спектра 512 при мягком хэндове. Ограничения обусловлены операцией регулировки 256 чипов синхронизации при мягком хэндове, но в любом случае не ожидается, что использование коэффициента расширения спектра 512 будет частым. Обычно такой коэффициент расширения спектра используется для обеспечения информации по управлению мощностью и пр., при обеспечении сервиса при минимальной активности нисходящего канала, как например, при загрузке файлов и т. д. Это также имеет

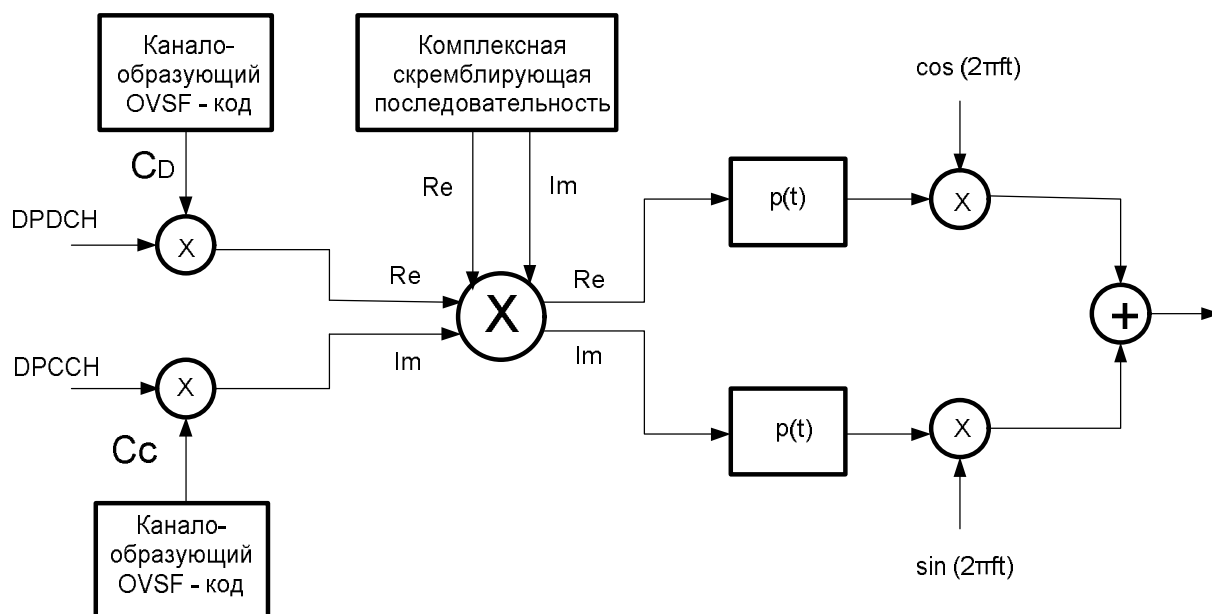


Рисунок 5.7 – Генерация сигналов DPDCH и DPCCH в восходящей линии

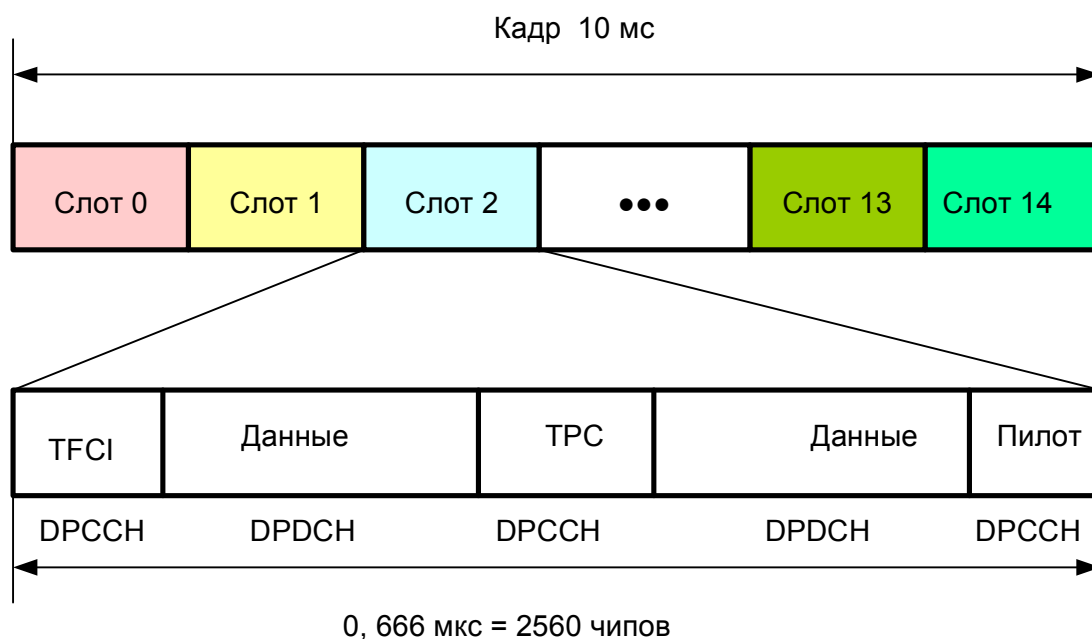


Рисунок 5.8 – Структура кадра при передаче в нисходящем направлении

место в CPCH, где информация об управлении мощностью при ограниченной длительности передачи по восходящему каналу обеспечивается с помощью DPCCH при коэффициенте расширения спектра 512. В этом случае мягкий хэндовер также не требуется.

Модуляция приводит к некоторым различиям в скоростях передачи в восходящем и нисходящем каналах. В то время как восходящий канал DPDCH имеет символы BPSK, нисходящий DPDCH имеет символы QPSK. Хотя часть

времени нисходящего DPDCH резервируется для DPCCN, особенно при высоких скоростях передачи данных, скорость передачи, которая согласуется с одним кодом в нисходящем DPDCH, почти в два раза выше, чем в восходящем DPDCH, при одинаковом коэффициенте расширения. Эти скорости передачи для нисходящего канала приводятся в таблице 5.7 при грубом определении скоростей передачи в битах, вычисленных на основе символов значений QPSK в нисходящем канале, зарезервированном для передачи данных. Затем они последовательно демультиплексируются в два параллельных потока данных, которые лежат в основе синфазной и квадратурной составляющих переданного сигнала. Двоичные сигналы в каждой ветви рассеиваются при помощи одного и того же кодового слова OVSF. Сигналы в синфазной и квадратурной ветвях рассматриваются в качестве действительной и мнимой частей комплексного сигнала. Этот сигнал скремблируется при помощи комплексной псевдослучайной последовательности длительностью 10 мс. Эта последовательность создается из двух соответствующим образом сдвинутых укороченных последовательностей Голда. На рисунке 5.9 изображен процесс генерации WCDMA – сигнала в нисходящем направлении.

Таблица 5.7 - Скорость передачи символов и битов в выделенном нисходящем канале

Коэффициент расширения спектра	Скорость передачи символов в канале, (кбит/с)	Скорость передачи бит, (кбит/с)	Диапазон битовых скоростей в канале DPDCH, (кбит/с)	Максимальная скорость передачи данных пользователя при кодировании со скоростью 1/2
512	7.5	15	3 – 6	1 – 3 кбит/с
256	15	30	12 – 24	6 – 12 кбит/с
128	30	60	42 – 51	20 – 24 кбит/с
64	60	120	90	45 кбит/с
32	120	240	210	105 кбит/с
16	240	480	432	215 кбит/с
8	480	960	912	456 кбит/с
4	960	1920	1872	936 кбит/с
4 при 3 параллельных кодах	2880	5760	5616	2,3 Мбит/с

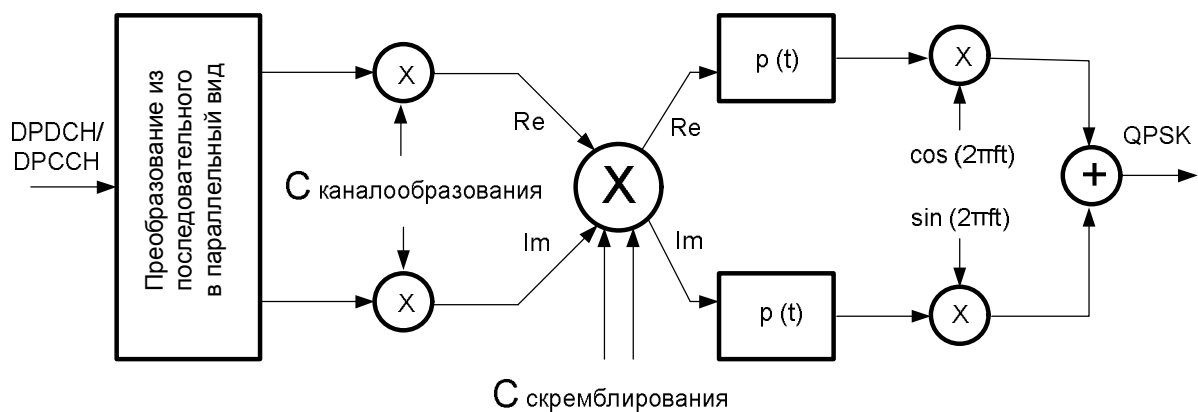


Рисунок 5.9 – Генерация WCDMA – сигналов в нисходящем направлении

Временной слот при передаче в нисходящем направлении также содержит пилот-сигнал, который обеспечивает когерентное детектирование данных подвижной станцией и позволяет использовать адаптивные антенны в нисходящем направлении [11].

Кроме выделенных каналов, в нисходящем направлении реализуются следующие физические каналы: *общий пилот-канал, канал синхронизации, первичный (вторичный) общий физический канал управления, канал индикации занятости, канал индикации вызова*. Назначение этих каналов подробно рассмотрено в [11].

5.2.3.2 Различия по радиointерфейсам между WCDMA и системами второго поколения

В таблице 5.8 приводятся основные различия между WCDMA и GSM, а в таблице 5.9 - различия между WCDMA и IS-95. При этом сравнении рассматривается только воздушный интерфейс. GSM охватывает также услуги и вопросы, связанные с базовой сетью, и эта платформа GSM будет использоваться вместе с интерфейсом WCDMA.

Различия в воздушном интерфейсе отражают новые требования систем третьего поколения. Например, для поддержки более высоких скоростей передачи требуется более широкая полоса частот - 5 МГц.

Разнесение при передаче включается в WCDMA для повышения пропускной способности нисходящего канала для поддержки требований асимметричной пропускной способности для нисходящего и восходящего каналов. Такое разнесение при передаче не поддерживается стандартами систем второго поколения. Комбинированное использование различных скоростей передачи, услуг и требований к качеству в системах третьего поколения требует усовершенствованных алгоритмов управления радиоресурсами для гарантирования качества обслуживания и максимизации пропускной способности системы. Кроме того, эффективная поддержка пакетированных данных не в реальном времени имеет большое значение для новых видов услуг.

Таблица 5.8 – Основные различия радиointерфейсов WCDMA и GSM

Параметр	WCDMA	GSM
Полоса частот радиока- нала	5 МГц	200 кГц
Коэффициент повторно- го использования частот	1	1 – 18
Управление качеством	Алгоритмы управления радиоресурсами	Частотно – территори- альное
Устойчивость к замира- ниям	Полоса частот 5 МГц обеспечивает борьбу с многолучевостью	Скачкообразная пере- стройка частоты
Разнесение (асимметрия) для нисходящего канала	Обеспечивается для по- вышения пропускной способности нисходяще- го канала	Стандартом не преду- сматривается
Частота управления мощностью	1500 Гц	2 Гц и ниже

Как WCDMA, так и IS-95 используют CDMA в режиме прямого расширения спектра. Более высокая скорость передачи элементов данных (чипов), составляющая 3,84 Мчипов/с в WCDMA, дает больший выигрыш в канале с многолучевостью, чем при скорости передачи 1,2288 Мчипов/с, особенно в небольших городских сотовых ячейках. Наиболее значимым обстоятельством является то, что многолучевое разнесение улучшает возможность доступа. Более высокая скорость передачи элементов сигнала также дает выигрыш при транкинге в режиме группового использования канала, особенно при больших скоростях передачи, по сравнению с узкополосными системами второго поколения.

WCDMA предполагает быстрое управление мощностью по замкнутому контуру управления как в восходящем канале, так и в нисходящем, тогда как IS-95 использует быстрое управление мощностью только в восходящем канале. Быстрое управление мощностью в нисходящем канале повышает качество работы канала и его пропускную способность. Оно требует новых функциональных возможностей подвижной связи, например, оценки SIR (отношения сигнал-помеха) и управления мощностью по внешнему контуру, что не требуется подвижным абонентам системы IS-95.

Система IS-95 была предназначена в основном для применения в макроячейках. Базовые станции макроячеек располагаются на мачтах или на крышах домов, где может легко приниматься сигнал GPS (Глобальной системы позиционирования).

Таблица 5.9 – Основные различия между радиointерфейсами WCDMA и IS-95

Параметр	WCDMA	IS - 95
Полоса частот	5 МГц	1, 25 МГц
Чиповая скорость	3, 84 Мчип/с	1, 2288 Мчип/с
Частота управления мощностью	1500 Гц	В восходящем канале 800 Гц, в нисходящем медленное управление мощностью
Синхронизация базовой станции	Не требуется	Через GPS
Алгоритмы эффективно-го управления радиоре-сурсами	Обеспечивает требуемое качество обслуживания	Не требуется для сетей передачи речи
Пакетирование данных	Изменение интенсивно-сти передачи пакетов в зависимости от нагрузки	Пакетированные данные передаются как отдель-ные сообщения при ком-мутации каналов
Разнесение передачи по нисходящему каналу	Поддерживается для по-вышения пропускной способности	Стандартом не поддер-живается

Базовым станциям IS-95 необходима синхронизация, и эту синхронизацию они обычно получают через систему GPS. Необходимость в сигнале GPS делает развертывание ячеек внутри помещений и микроячеек делом более сложным, поскольку прием сигналов GPS затруднен без доступа к спутниковым системам GPS по линии прямой видимости. Поэтому технология WCDMA предусматривается для работы с асинхронными базовыми станциями, где не требуется синхронизации от GPS. Применение асинхронных базовых станций делает эстафетную передачу управления в системе WCDMA несколько отличной от системы IS-95.

В WCDMA считается важным иметь межчастотную передачу управления для максимизации использования нескольких несущих на базовой станции. В системе IS-95 межчастотные измерения не предусмотрены, что делает межчастотные передачи управления более сложными.

5.2.3.3 Режим UTRA TDD

Рассмотрим режим UTRA TDD. Параметры этого режима были приведены в таблице 5.5. Часть спектра, выделенная системе UMTS, представлена в виде непарных диапазонов [23]. В этих диапазонах работа в режиме FDD исключена, поэтому применяется режим TDD.

UTRA TDD, универсальный наземный радиодоступ, использующий дуплекс с временным разделением, предназначен для работы в непарном спектре. На рисунке 5.10 показан принцип работы в режимах FDD и TDD.

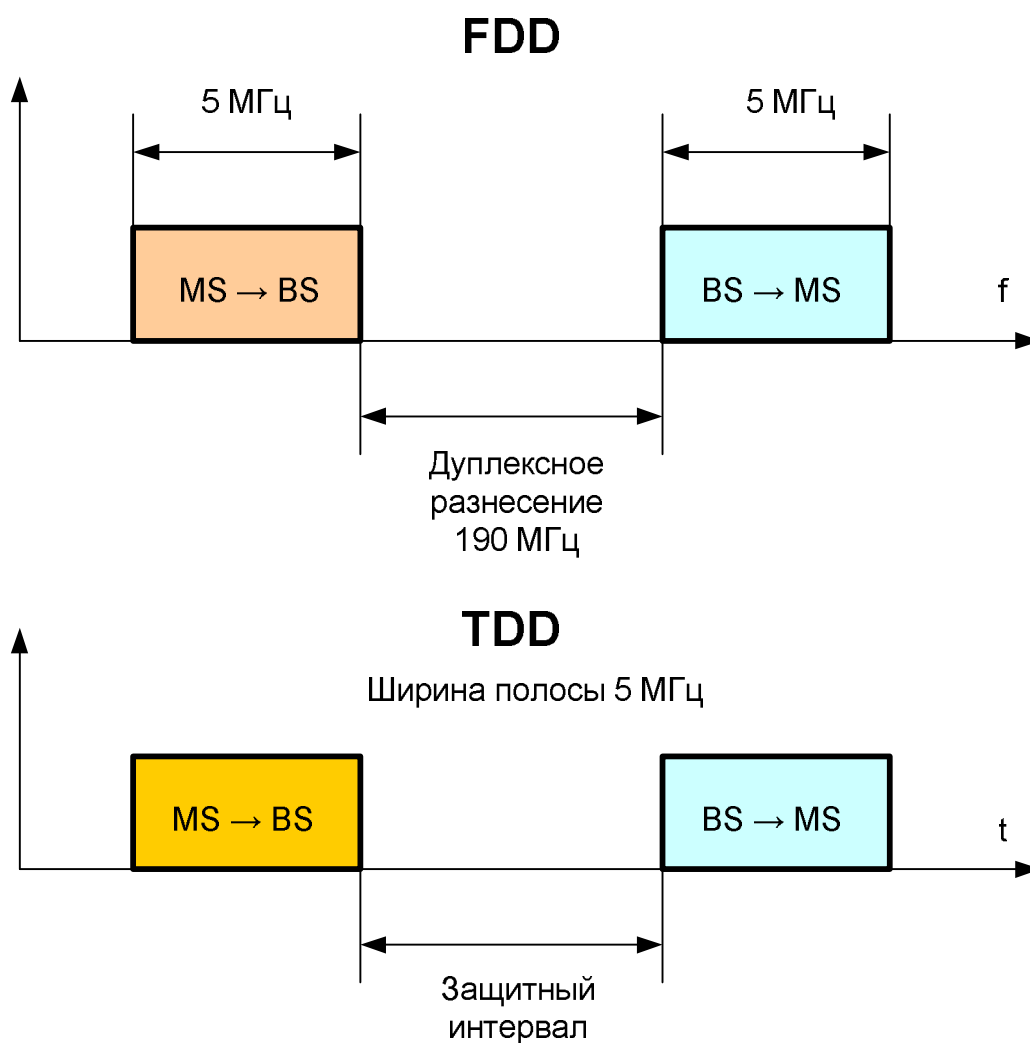


Рисунок 5.10 – Дуплексный разнос с частотным и временным разделением

Ниже перечисляются несколько характеристик, присущих системе с TDD:

1) *использование непарной полосы частот*

Система TDD может быть реализована на непарной полосе, тогда как система FDD всегда требует пары полос. В будущем более вероятно, что ресур-

сы непарного спектра будут предоставлены для UMTS, так как для работы TDD не требуется никакой пары частот.

2) прерывистая передача

Коммутация между направлениями передачи требует времени, и управления переходными процессами при коммутации. Во избежание нарушения передачи в восходящем и нисходящем каналах необходимо согласование направлений передачи и допускаемого времени прерывания передачи. Нарушения передачи можно избежать посредством назначения защитного интервала, который позволяет для сохранения передачи задавать задержку на переключение направления. Прерывистая передача может также вызвать звуковые помехи в аудиоаппаратуре, которая не соответствует требованиям по электромагнитной уязвимости.

3) помехи между восходящим и нисходящим каналами

Так как восходящий и нисходящий каналы совместно используют одну и ту же полосу частот, сигналы в этих двух направлениях передачи могут мешать друг другу. В FDD эти помехи полностью подавляются с помощью дуплексного разнесения на 190 МГц. В UTRA TDD отдельные базовые станции синхронизируются друг с другом на уровне фрейма для того, чтобы избежать воздействия этих помех.

4) асимметричное распределение емкости (пропускной способности) в восходящем/нисходящем каналах

При работе с TDD восходящий и нисходящий каналы делятся во временной области. Есть возможность изменить точку коммутации дуплекса и переместить пропускную способность с восходящего канала на нисходящий или наоборот в зависимости от требования, предъявляемого к пропускной способности восходящего и нисходящего каналов.

5) реверсивные (двусторонние) свойства канала

Быстрые замирания зависят от частоты, и поэтому в системах FDD быстрые замирания не коррелируются между восходящим и нисходящим каналами. Так как одна и та же частота в TDD используется и для восходящего, и для нисходящего каналов, то быстрые замирания одни и те же и в восходящем, и в нисходящем каналах. Основываясь на принимаемом сигнале, приемопередатчик в режиме TDD может оценить быстрые замирания, которые будут влиять на его передачу. Знание замираний может использоваться в управлении мощностью и в способах использования адаптивных антенн в TDD.

Дуплексная передача данных с временным разделением позволяет асимметрично распределить время между двумя направлениями передачи. Это разделение может динамично подстраиваться под текущий трафик. Легко может быть реализована передача с различными скоростями. Еще одно свойство режима – обратимость каналов. Так как передача данных в обоих направлениях ведется в одном и том же участке спектра, то измерения, проводимые при передаче данных в одном направлении, могут быть применены и для обратного направления. На рисунке 5.10 показан формат кадра в режиме UTRA TDD.

Режим UTRA TDD использует комбинированную схему множественного доступа с временным и кодовым разделениями (TD/CDMA). Различные сигналы пользователя разделяются и во временном, и в кодовом доменах (рисунок 5.11).

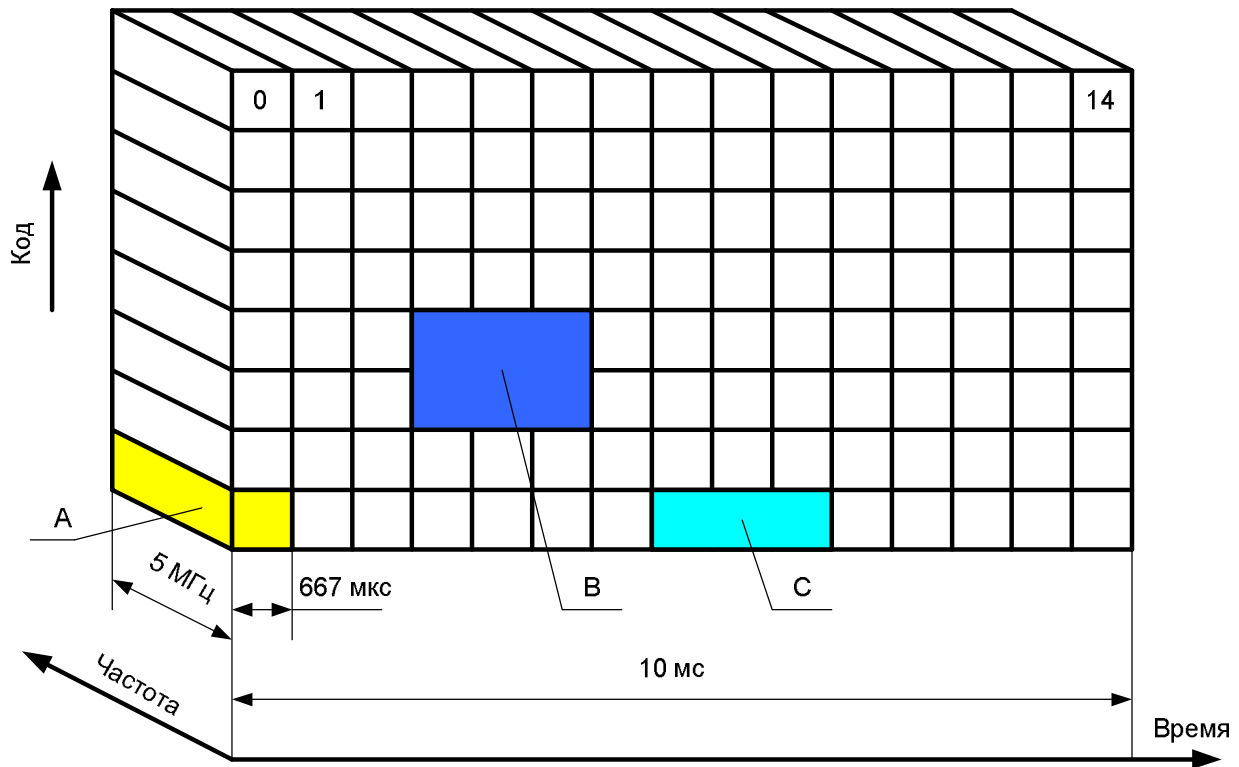


Рисунок 5.11 – Пример выделения ресурсов соединениям с различными скоростями передачи данных:

А – одинарный канал (один временной слот и одна расширяющая кодовая последовательность); В – соединение, использующее три слота и две расширяющие последовательности; С – три слота и одна кодовая последовательность

В таблице 5.10 приведены параметры UTRA на физическом уровне. Все главные параметры на радиочастоте для UTRA в режимах FDD и TDD гармонизированы.

Таблица 5.10 - Сравнение основных параметров UTRA FDD и TDD на физическом уровне

	UTRA TDD	UTRA FDD
Метод множественного доступа	CDMA	CDMA
Дуплексный метод	TDD	FDD
Разнесение каналов	5 МГц (номинальное)	
Скорость передачи чипов на несущей	3,84 Мчип/с	
Структура временного слота	15 слотов/фрейм	
Длина фрейма	10 мс	
Концепция множества скоростей	Мультикод, мультислот и переменный коэффициент расширения спектра в ортогональной системе (OVSF)	Мультикод и OVSF
Коды с прямым исправлением ошибок (FEC)	Сверточное кодирование $R = 1/2$ или $1/3$. Ограниченная длина $K = 9$, турбокодирование (8 состояний, параллельный усеченный сверточный кодер, $R = 1/3$) или кодирование, связанное с услугами	
Перемежение	Перемежение между фреймами (10, 20, 40 и 80 мс)	
Модуляция	QPSK	
Типы пакетов	Три типа: информационные пакеты, пакеты с произвольной выборкой и пакеты синхронизации	Не классифицируются
Обнаружение	Когерентное, основанное на мидамбуле	Когерентное, основанное на пилот-символах
Управление мощностью выделенного канала	Восходящий канал: открытый контур; 100 Гц или 200 Гц Нисходящий канал: замкнутый контур; скорость ≤ 800 Гц	Быстрое, замкнутый контур; 1500 Гц
Внутричастотный хэндовер	Жесткий хэндовер	Мягкий хэндовер
Межчастотный хэндовер	Жесткий хэндовер	
Распределение каналов	Медленное и быстрое динамическое назначение каналов (DCA)	DCA не требуется
Подавление помех внутри ячейки	Поддержка с использованием совместного обнаружения	Поддержка с использованием усовершенствованных приемников на базовой станции
Коэффициенты расширения спектра	1...16	4...512

Транспортные каналы в режиме UTRA TDD можно разделить на выделенные и общие каналы. Выделенные каналы (DCH) характеризуются, в основном, тем же самым способом, как и в режиме FDD. Общие каналы можно в дальнейшем разделить на общие каналы управления (CCCH), канал случайного доступа (RACH), совмещенный нисходящий канал (DSCH) в нисходящем направлении и совмещенный восходящий канал (USCH) в восходящем направлении. Затем каждый из этих транспортных каналов преобразуется в соответствующий физический канал (переносится на соответствующий физический канал).

Физическими каналами UTRA TDD являются выделенный физический канал (DPCH), общий физический канал управления (CCPCH), физический канал со случайным доступом (PRACH), канал индикатора вызова (PICH) и канал синхронизации (SCH). Для SCH и PICH не существуют соответствующие транспортные каналы.

В UTRA TDD принятой модуляцией является QPSK (квадратурная фазовая манипуляция). Спектр модулирующих символов передачи данных расширяется с помощью специального кода формирования каналов переменной длины в 1 – 16 символов. Модулированные и расширенные по спектру данные затем скремблируются псевдослучайной последовательностью длиной в 16 символов. Тот же самый тип ортогональных кодов формирования каналов используется в системе UTRA FDD. Вслед за расширением спектра данных идет скремблирование с помощью последовательности скремблирования, ориентированной на конкретную ячейку или источник; процесс скремблирования – это последовательное перемножение чипа за чипом. Процедура перемножения с использованием кода каналов и кода скремблирования применительно к конкретной ячейке – это процедура расширения спектра, ориентированная на конкретного пользователя или ячейку. И, наконец, каждый чип в передатчике фильтруется с учетом формы импульса с помощью синусквадратичного фильтра с коэффициентом спада (крутизны) $\alpha = 0,22$, идентичного применяемому в UTRA FDD.

Физическая структура фрейма подобна структуре в режиме UTRA FDDA. Длительность фрейма равна 10 мс, и она делится на 15 временных слотов, каждый из которых равен 2560 чипам, т. е. длительность временного слота составляет 666 мкс. Структура фрейма показана на рисунке 5.12.

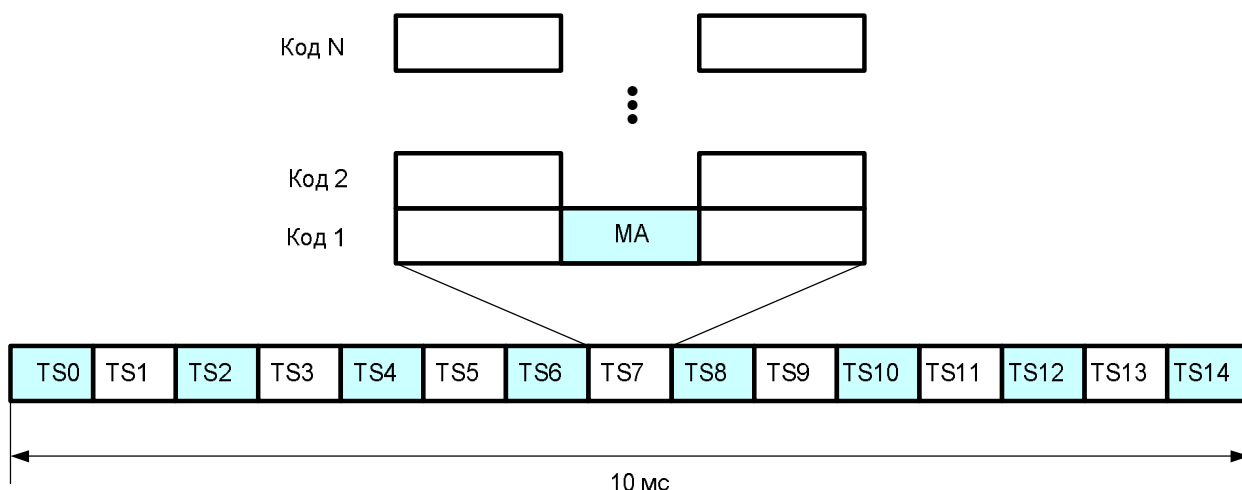


Рисунок 5.12 – Структура фрейма UTRA TDD:
число кодовых каналов, которые могут использоваться в одном
временном слоте, изменяется в зависимости от условий распространения
(MA = мидамбула)

Каждый из 15 временных слотов во фрейме 10 мс относится либо к восходящему, либо к нисходящему каналам. Наличие множественных точек коммутации для различных направлений передачи на фрейм позволяет осуществлять управление мощностью в замкнутом контуре и использовать физический канал синхронизации (PSCH) в выделенных слотах в нисходящем направлении для ускорения поиска ячейки. С другой стороны, для того, чтобы можно было охватить динамические асимметричные услуги, гибкость в распределении слотов в нисходящем/восходящем направлении гарантирует эффективное использование спектра. Для поддержания максимальной гибкости при одновременном управлении мощностью в замкнутом контуре, когда требуется это, SCH имеет минимум два временных слота на кадр для передачи в нисходящем канале при использовании в сотовых системах. На рисунке 5.13 (а) показано такое максимальное асимметричное распределение слотов в восходящем канале (2:13). PSCH переносится в два нисходящих слота. Для систем общего пользования можно использовать схему SCH с одним слотом на фрейм. С другой стороны, самое меньшее один временной слот должен назначаться при передаче в восходящем направлении для канала со случайным доступом. На рисунке 5.13 (б) показана максимальная асимметрия 14:1 в нисходящем канале.

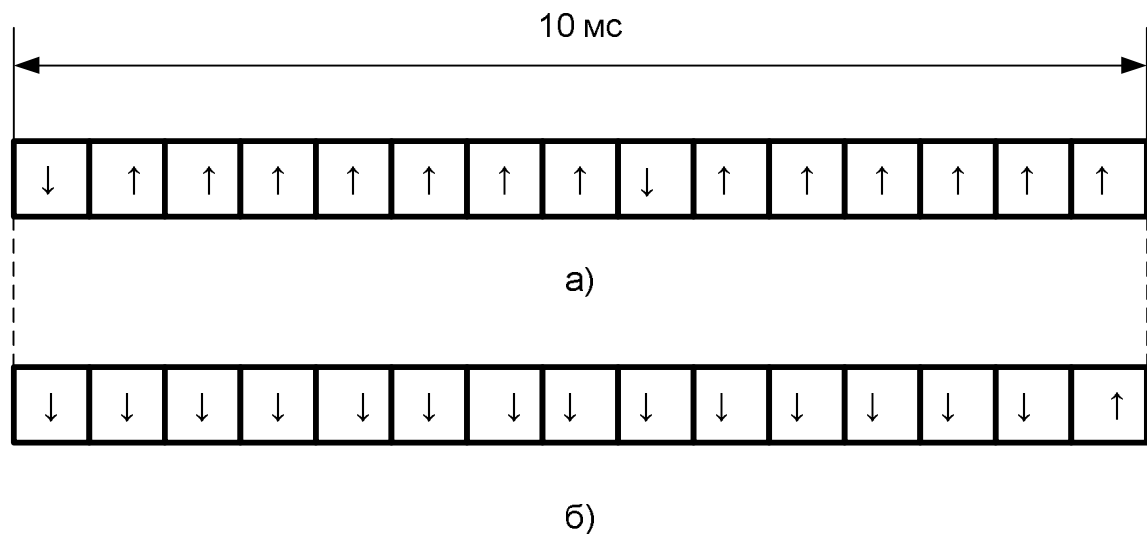


Рисунок 5.13: (а) - максимальная асимметрия в восходящем канале 2:13. Два слота на фрейм назначаются для передачи в нисходящем канале; для слотов нисходящего канала назначается канал синхронизации;
(б) - максимальная асимметрия в нисходящем канале (14:1)

Так как передача TDMA в UTRA TDD является прерывистой, то средняя мощность передачи уменьшается на коэффициент $10 \times \log_{10}(n/15)$, где n – число активных временных слотов на фрейм. Например, для обеспечения одной и той же зоны обслуживания с помощью UTRA TDD при использовании одного временного слота для скорости передачи 144 Кбит/с потребуется самое меньшее, в 4 раза больше базовых станций в сайте, чем в режиме UTRA FDD. Это дает

уменьшение средней мощности на 12 дБ, что приведет в типовой среде макро-ячейки к уменьшению дальности обслуживания ячейки более чем наполовину и, таким образом, площади ячейки до $\frac{1}{4}$. Когда используется одно и тоже аппаратное оборудование в UE, прерывистая передача TDMA с низким рабочим циклом приводит к уменьшению дальности связи по восходящему каналу. При более высоких скоростях передачи данных разность в зоне обслуживания по сравнению с FDD уменьшится. Из-за этих особенностей TDD следует использовать в среде небольших ячеек, где мощность не является ограничивающим фактором, а скорости передачи данных, используемые при планировании зоны обслуживания, высокие.

Существует три типа пакетов: информационный пакет, пакет случайного доступа и синхропакет. Пакет произвольного доступа используется только в восходящем направлении, а синхропакет – только в нисходящем. Информационный пакет является двунаправленным.

Существует два типа информационных пакетов трафика в UTRA TDD. На рисунке 5.14 показана структура пакета обычного нисходящего канала, а на рисунке 5.15 – структура пакета трафика в восходящем канале с управлением мощностью передачи (TPC) и индикатором комбинации транспортного формата (TFCI). Оба формата пакетов и в восходящем, и в нисходящем каналах имеют два варианта длины мидамбулы и могут использоваться для всех видов услуг вплоть до передачи со скоростью 2 Мбит/с. Логический канал трафика (TCH), который содержит пользовательские данные, образует канал передачи трафика.

Пакет данных содержит 2 поля данных, разделенных мидамбулой, за которыми следует защитный интервал. Продолжительность пакета равна одному временному слоту. Мидамбула (обучающая последовательность) используется и для выравнивания каналов, и для обеспечения когерентного приема в приемнике. Мидамбула уменьшает полезную нагрузку пользовательских данных. В таблице 5.10 подробно показаны различные структуры информационного пакета.

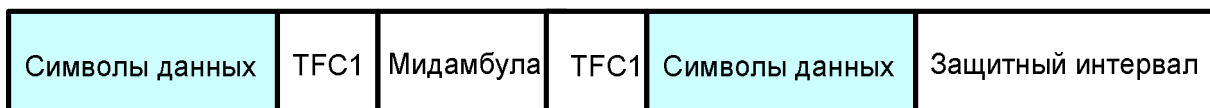


Рисунок 5.14 - Обобщенная структура информационного пакета трафика в нисходящем канале UTRA TDD

Поля данных разделяются мидамбулой, которая используется для оценки канала. Индикатор комбинации транспортного формата (TFCI) используется для указания комбинации используемых транспортных каналов в выделенном физическом канале (DPCH) и передается только один раз на фрейм. TFCI использует управление по каналам сети и имеет свое собственное кодирование. Число бит в TFCI может меняться и устанавливаться в начале вызова.

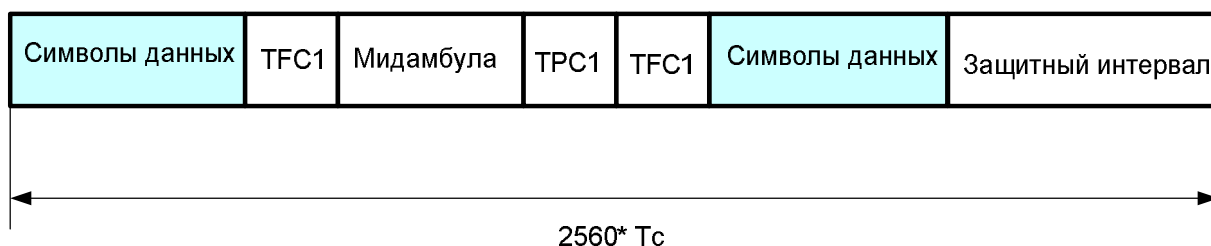


Рисунок 5.15 - Обобщенная структура пакета в восходящем канале

Имеется как управление мощностью передачи (TPC), так и TFCI. И управление, и индикация передаются по одному и тому же физическому каналу и используют управление по каналам сети. Продолжительность команды TPC равна одному символу.

Таблица 5.11 - Структуры полей пакетов трафика

Наименование пакета	Длина поля данных 1	Длина обучающей последовательности	Длина поля данных 2	Длина защитного интервала
Пакет данных I	976 чипов	512 чипов	976 чипов	96 чипов
Пакет данных II	1104 чипа	256 чипов	1704 чипа	96 чипов

Из-за более длинной мидамбулы пакет типа I применяется для оценки импульсных характеристик 16 различных восходящих каналов. Пакет типа II может использоваться для нисходящего канала независимо от числа активных пользователей. Если имеется менее 4 пользователей во временном слоте, пакет типа II можно также использовать для восходящего канала.

Мидамбулы, т.е. обучающие последовательности различных пользователей, являются реализациями, различающимися по временному сдвигу одной и той же периодической последовательности базисного кода. Различные ячейки используют различные периодические базисные коды, т.е. различные последовательности. Из-за того, что мидамбулы получают из одного и того же периодического основного кода, оценка каналов всех активных пользователей в пределах одного временного слота может выполняться совместно, например, с помощью одного отдельного циклического коррелятора. Оценки импульсных характеристик каналов различных пользователей получают последовательно со сдвигом во времени на выходе коррелятора.

В Версии-99 3GPP в нисходящем канале используют либо коэффициент расширения спектра 16 с возможностью мультикодовой передачи, либо коэффициент расширения спектра 1 для приложений с высокой скоростью передачи

в том случае, когда эти возможности поддерживаются терминалами. В восходящем канале используются коды с переменным коэффициентом расширения в ортогональной системе (OVSF) и с коэффициентами расширения спектра от 1 до 16. В целом, число переменных форматов информационного пакета составляет 20 в нисходящем канале и 100 – в восходящем.

В таблице 5.12 показаны скорости передачи данных пользователей для UTRA TDD при канальном кодировании со скоростью $\frac{1}{2}$ и коэффициенте расширения спектра 16. При этом затраты на хвостовые биты, TFCI, TPC или CRC не учитывались. Коэффициенты расширения спектра, отличные от 16, (из схемы с переменным ортогональным расширением) можно понимать как подмножества коэффициента расширения 16 (т. е. коэффициент расширения 8 в восходящем канале соответствует двум параллельным кодам с коэффициентом расширения 16 в нисходящем канале). Когда число требуемых слотов превышает 7, тогда соответствующая скорость передачи данных может обеспечиваться только для восходящего, или только для нисходящего каналов. Скоростями передачи данных, показанными в таблице 5.12, являются скорости передачи бит, ограниченные временным слотом и кодом, при этом скорость передачи данных, ограниченная максимальными помехами, может быть ниже.

Таблица 5.12 - Скорости передачи данных пользователей
через воздушный интерфейс

UTRA TDD	Число выделенных (назначенных) временных слотов		
Число выделенных (назначенных) кодов с коэффициентом расширения спектра 16	1	4	13
1	13,8 Кбит/с	55,2 Кбит/с	179 Кбит/с
8	110 Кбит/с	441 Кбит/с	1,43 Мбит/с
16 (или коэффициент расширения 1)	220 Кбит/с	883 Кбит/с	2,87 Мбит/с

С точки зрения обслуживания UTRA и TDD и FDD могут обеспечить сервис как с низкими, так и с высокими скоростями передачи данных с практически одинаковым качеством обслуживания (QoS). Единственным исключением для UTRA TDD является то, что с определенного момента самые высокие скорости передачи данных являются асимметричными. Зона обслуживания UTRA TDD будет меньше для услуг со скоростями передачи данных от низких до средних, чем для сравнимых услуг UTRA FDD, что обусловлено рабочим циклом TDMA. Кроме того, для того, чтобы избежать воздействия помех, меньшие ячейки обеспечивают более подходящую схему. Поэтому UTRA TDD лучше всего подходит для небольших ячеек и для услуг с высокой скоростью передачи данных.

5.3 Радиоинтерфейс cdma2000

Технология cdma2000 обеспечивает эволюционный переход от узкополосных систем с кодовым разделением каналов IS-95 (американский стандарт цифровой сотовой связи второго поколения) к системам CDMA «третьего поколения» и получила наибольшее распространение на североамериканском континенте, а также в странах Азиатско-Тихоокеанского региона.

Первая стадия стандарта cdma2000, названная *cdma2000 1x*, представляет собой расширение существующего стандарта IS-95B. Она позволяет удвоить емкость системы и увеличить скорость передачи данных до 614 кбит/с.

Вторая фаза, названная *cdma2000 1xEV (Evolution - эволюция)* является результатом дальнейшего развития стандарта *cdma2000 1x*. Она включает в себя технологию *HDR (High Data Rate – высокоскоростная передача данных)*, обеспечивающую передачу данных со скоростью до 2,4 Мбит/с.

В третьей фазе развития *cdma2000 3x* вводится использование трех независимых и не перекрывающихся CDMA каналов. При этом сохраняется обратная совместимость со стандартами *cdma2000 1x* и IS-95. Утроение ширины частотного диапазона и снятие некоторых ограничений позволяет расширить гамму услуг и повысить скорость передачи данных до 2 Мбит/с.

На рисунке 5.16 показано распределение спектра в стандартах *cdma2000 1x* и *3x*.

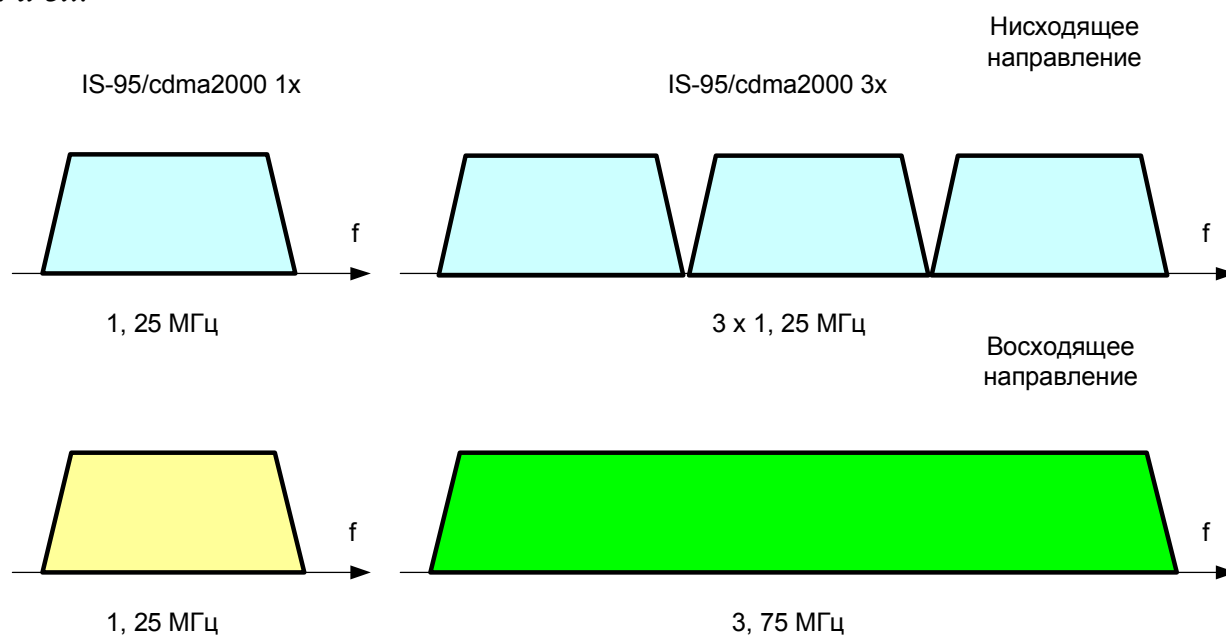


Рисунок 5.16 – Распределение спектра в системах cdma2000 1x и 3x

В таблице 5.13 приведены наиболее важные параметры системы cdma2000 [11, 30].

Таблица 5.13 – Основные параметры системы cdma2000

Параметры	cdma2000 1x	cdma2000 3x
Ширина канала, МГц	1, 25	3 x 1, 25
Нисходящий (DL) канал. Канальная структура	Прямое расширение спектра (DS)	Несколько несущих, DS на каждой несущей
Восходящий (UL) канал. Канальная структура	Прямое расширение спектра (DS)	Прямое расширение спектра (DS)
Чиповая скорость, Мчип/с	1, 2288 в нисходящем и восходящем каналах	1, 2288 на каждую несущую в нисходящем канале. 3, 6864 в восходящем канале
Длина кадра. мс	20/5 (опционально для сигнальных каналов)	
Тактирование	Синхронное от GPS	
Канальное кодирование	Сверточное, турбо-кодирование или без кодирования	
Модуляция	QPSK	
Детектирование	Когерентное	
Коэффициент расширения	4 - 256	
Расширение в нисходящем канале	Последовательности Уолша переменной длины, m-последовательности длиной 2^{15} (фазовый сдвиг определяет соту)	
Расширение в восходящем канале	Последовательности Уолша переменной длины, m-последовательности длиной 2^{41-1} (фазовый сдвиг определяет пользователя)	
Возможность изменения скорости передачи данных	Изменяющееся расширение спектра и мультикоды	

Полный перечень физических каналов в cdma2000 приведен в [30]. В качестве примера рассмотрим *передачу данных по прямому дополнительному каналу*. Этот канал используется для переноса пользовательской информации совместно с основным каналом на более высоких скоростях. Для передачи данных с небольшими скоростями используется сверточное кодирование, а для передачи данных с высокими скоростями – турбо – кодирование. Одному соединению может быть выделено несколько прямых дополнительных каналов. В результате можно получить широкий спектр скоростей передачи данных, начиная от 9,6 кбит/с и кончая 921,6 кбит/с при использовании набора скоростей RS2 в конфигурации системы cdma2000 с тремя несущими. При передаче по дополнительным каналам каналообразующие функции Уолша могут иметь различную длину, зависящую от скорости входного потока. Они выбираются та-

Входной поток, RS 232

Добавление 16-битового CRC-блока

Концевые и резервные биты кодера

Сверточный кодер, $\kappa=9, R=1/4$

Блочный перемежитель

A

13, 2 кбит/с
27,6 кбит/с
56, 4 кбит/с
114, 0 кбит/с
229, 2 кбит/с
459, 6 кбит/с
920, 4 кбит/с

14, 4 кбит/с
28, 8 кбит/с
57, 6 кбит/с
115, 2 кбит/с
230, 4 кбит/с
460, 8 кбит/с
921, 6 кбит/с ($R=1/2$)

14, 4 кбит/с
2304 бит
4608 бит
9216 бит
18432 бит
36964 бит
36864 бит на 20-мс кадр

Маска длинного псевдослучайного кода n-го абонента

Генератор длинного кода

Дециматор

A

Демуплексирование

Биты управления мощностью (16 бит/20 мс)

MUX и IQ отображение, преобразование в биполярный вид

MUX и IQ отображение, преобразование в биполярный вид

MUX и IQ отображение, преобразование в биполярный вид

Функция Уолша №1

Функция Уолша №2

Функция Уолша №3

С скремблирования

С скремблирования

С скремблирования

p(t)

p(t)

p(t)

cos(2πft)

sin(2πft)

cos(2πft)

sin(2πft)

cos(2πft)

sin(2πft)

Несущая 1

Несущая 2

Несущая 3

+

+

+

- 127 -

К блоку данных, который должен быть передан в 20-мс кадре, сначала добавляется 16 CRC-битов, затем оконечные и резервные биты. После этого блок кодируется сверточным кодом с длиной кодового ограничения $k = 9$ и коэффициентом кодирования $R=1/4$. Полученный блок данных подвергается перемежению и суммируется по модулю 2 с прореженным выходным потоком генератора длинного кода с маской, специфичной для n -го пользователя. Поток данных разделяется на три ветви, поток каждой из которых генерирует CDMA-сигнал на отдельной несущей. Двоичные потоки отображаются на синфазные и квадратурные компоненты и переводятся из двоичной в биполярную форму. Затем обе последовательности рассеиваются функциями Уолша, которые выступают в роли кодов каналаобразования, после чего скремблируются псевдослучайной комплексной последовательностью длиной 2^{15} элементов. Фаза этой последовательности определяет соту. После процесса скремблирования синфазные и квадратурные выходные потоки формируются низкочастотными фильтрами и модулируют соответствующие несущие частоты.

Обратные физические каналы можно разделить на выделенные каналы, которые предназначены для связи отдельных подвижных станций с базовой, и общие каналы, используемые для передачи на базовую станцию информации от многих подвижных станций.

Обратный основной канал R-FCH используется для передачи пользовательских данных. Скорость передачи данных зависит от используемого набора скоростей. В наборы RS3 и RS5 входят скорости 1, 5; 2, 7; 4, 8; и 9, 6 кбит/с, а в наборы RS4 и RS6: 1, 8; 3, 6; 7, 2 и 14,4 кбит/с.

5.4 Сравнение технологий WCDMA и cdma2000

Сравним технологии WCDMA и cdma2000 (таблица 5.13). Ключевое отличие cdma2000 и WCDMA, которое стало предметом острой полемики, -разные чиповые скорости 3,6884 и 3,84 Мчип/с. Выбор чиповой скорости в проекте cdma2000 произведен из условия обеспечения обратной совместимости с cdmaOne (3x1,2288 Мчип/с) и возможности использования на переходном этапе к IMT-2000 двухрежимных терминалов типа CDMA2000/cdmaOne. В отличие от cdmaOne, разрабатываемый в Европе и Японии стандарт WCDMA не преследует целей обеспечения совместимости с существующими сетями связи, хотя заложенные в нем решения базируются на использовании единых базовых сетей GSM MAP, ANSI-41 и IP-сетей.

Для разделения сигналов базовых станций в cdma2000 используются короткие коды длиной 2^{15} с разными циклическими сдвигами, что требует их взаимной синхронизации. Асинхронный принцип построения сети WCDMA делает ее независимой от внешнего источника синхронизации. Такая возможность обеспечивается за счет использования разных кодов Голда (для разделения базовых станций).

Начальная синхронизация мобильных станций в системе cdma2000 обеспечивается по общему пилот-сигналу, излучаемому каждой базовой станцией.

Так как все БС в сети синхронны, то никакой дополнительной синхронизации не потребуется. После захвата пилот-сигнала мобильная станция определяет все параметры, необходимые для когерентной демодуляции сигнала и обеспечения хэндовера.

Процедура начального поиска в системе WCDMA более сложная, так как осуществляется в три этапа. Однако с точки зрения быстродействия она обладает преимуществом, т.к. на каждом этапе область неопределенности сравнительно невелика. Время установления начальной синхронизации в cdma2000 несколько выше из-за большой априорной неопределенности.

Между рассматриваемыми технологиями есть и много общего. Прежде всего, для увеличения пропускной способности в них используется мультикодовая передача, позволяющая выделить одному пользователю сразу несколько каналов. Оба стандарта предусматривают динамическое управление мощностью в прямом и обратном каналах связи, хотя в проекте WCDMA используется более быстродействующая схема управления мощностью. Повышение помехоустойчивости обеспечивается за счет разнесения на передаче, использования сверточных и турбо-кодов и др.

Таблица 5.14 - Сравнительные характеристики cdma2000 и WCDMA

Система	cdma2000	WCDMA
Диапазон частот, МГц	824-849/869-894 и 1900	1920-1980, 2110-2170
Полоса частот, МГц	3,75 (3 x 1,25)-базовая 1,25 xN, где N=1,6, 9, 12	5 - базовая 1,25; 10 и 20
Метод доступа	MC-CDMA	DS-CDMA
Совместимость	Обратная совместимость с cdmaOne	Совместная эксплуатация с GSM и обеспечение хэндовера
Чиповая скорость, Мчип/с	3,6864 (3x1,2288)-базовая Nx1,2288, где N=1,6, 9, 12	3,84 (базовая), 7,78 и 15,56
Кодирование	Сверточный код (K=9, R=1/2, 1/3, 1/4), турбо-код (K=4)	Сверточный код (K=9; R=1/2, 1/3) + код Рида-Соломона, турбо-код (K=3)
Синхронизации базовых станций	Синхронная работа	Асинхронная работа (возможна синхронная)
Ортогональные коды	Функции Уолша и квазиортогональные коды	Ортогональные коды переменной длины OVSF с коэффициентом расширения 1-512 (4-256 в UTRA)
Расширяющие последовательности	Короткие коды длиной 2^{15} и длинные коды длиной $(2^{42}-1)$	Коды Голда
Схема поиска сот	По пилот-сигналу	Трехэтапный поиск (поиск кода Голда, кадровая синхронизация, идентификация скремблирующего кода)
Длина кадра, мс	5, 20	10

Продолжение таблицы 5.14

Модуляция данных	«вниз»	QPSK	QPSK
	«вверх»	BPSK	BPSK
Расширяющая модуляция	«вниз»	QPSK	QPSK
	«вверх»	QPSK	QPSK или HPSK (OCQPSK)
Метод автоматического переключения каналов		Мягкий, жесткий (межчастотный)	Мягкий, жесткий (межчастотный или межсистемный)
Управление мощностью		Скорость 0,8 кбит/с, шаг управления 0,25; 0,5 и 1,0	Скорость 1,6 кбит/с, шаг управления 0,25-1,5

5.5 Технология HSPA в сетях сотовой связи UMTS

HSPA (High Speed Packet Access) – это технология высокоскоростной передачи данных в сетях сотовой связи стандарта UMTS. Этот стандарт разрабатывался с учетом возросших потребностей к мобильному широкополосному доступу в Интернет. В релизе R99 стандарта UMTS предусматривалась скорость передачи данных до 2Мбит/сек. Благодаря такой скорости абонент мог путешествовать по web-сайтам, слушать музыку, смотреть сжатое видео и скачивать файлы небольшого объема. Однако в реальности скорости передачи данных по данной технологии не превышали 200-300 кбит/сек. Этого совершенно не хватало для просмотра качественного потокового видео и загрузки файлов больших объемов, а именно эти возможности оказались особенно востребованными в начале 2000 годов. Чтобы решить эту проблему, требовалась новая технология.

Технологию HSPA можно разделить на 2 составные части: HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) и HSUPA (High Speed Uplink Packet Access). Первая обеспечивает высокоскоростной доступ в направлении downlink - от базовой станции к мобильной станции, а вторая наоборот: uplink – от мобильной станции к базовой станции.

HSDPA позволяет достичь скорости передачи данных до 14,4 Мбит/сек, а HSUPA до 5,7 Мбит/сек (рисунок 5.18). Такой качественный скачок обусловлен рядом изменений в программной и аппаратной частях NodeB, RNC и UE. В первую очередь для обеих технологий заменяется способ модуляции на 16-QAM (Quadrature amplitude modulation). Также внесены некоторые модификации в существующие механизмы работы сети и ряд функций перенесено с RNC на Node B.

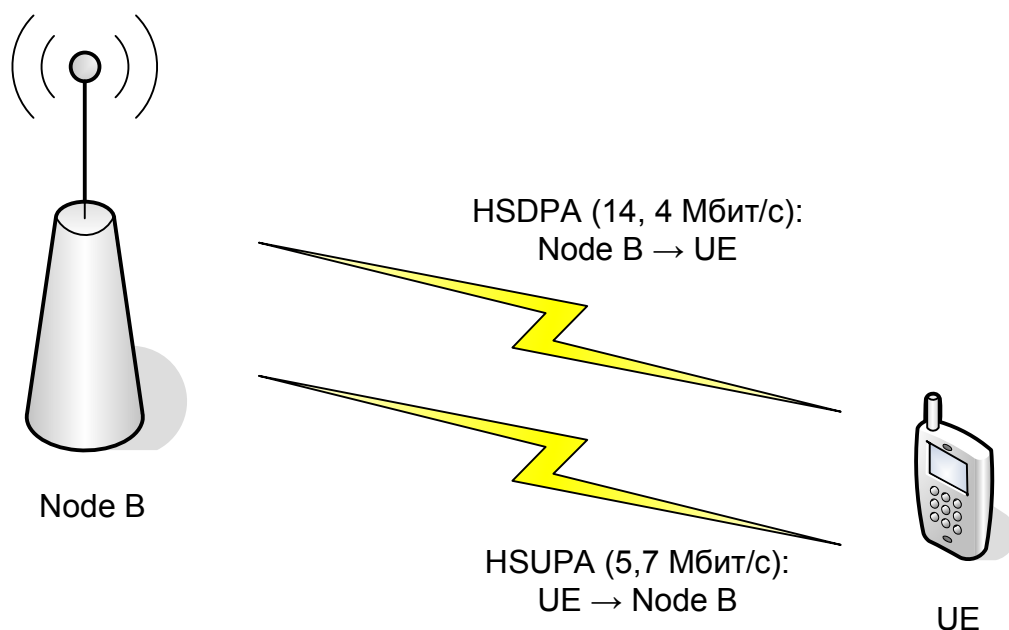


Рисунок 5.18 – Технологии HSDPA и HSUPA

Однако, в отличие от GPRS / EDGE, это не единственное важное изменение. Наряду с новым методом HSDPA предусматривает также использование скоростной системы автоматических перезапросов HARQ (Hybrid automatic repeat request). Этот механизм отвечает за автоматический перезапрос потерянных или испорченных ошибок пакетов. Подобный механизм под названием ARQ (Automatic repeat request) уже использовался в релизе R99. Однако перезапрашивающим сетевым элементом для ARQ служил RNC (Radio Network Controller). Известно, что наибольшим мешающим воздействием информационный сигнал подвержен на интерфейсе между UE и Node B, а далее до RNC сигнал передается по радиорелейным линиям связи, либо по волоконно-оптическим линиям связи, которые, как правило, имеют собственные механизмы защиты от помех. В связи с этим оказалось целесообразно перезапрашивать искаженные пакеты в Node B, что значительно сократит ожидание повторной передачи. Сами пакеты были уменьшены в размерах в 10 раз, что также способствует сокращению времени ожидания. Кроме того, на радиоинтерфейсе были введены специальные каналы, которые обладают специфическими особенностями, способствующими увеличению скорости передачи данных.

Скоростей передачи данных, предоставляемых HSDPA и HSUPA, вполне достаточно для получения современных мультимедийных услуг, включая потоковое видео, загрузка и скачивание файлов больших размеров, сетевые игры и т.д. С подобными скоростями передачи данных сети стандарта UMTS вполне могут составить конкуренцию фиксированному доступу в Интернет, а за счет большого числа операторов сотовой связи цены мобильного доступа в Интернет также постепенно будут приближаться к стоимости фиксированного доступа.

5.6 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные требования к системам IMT – 2000 по пропускной способности.
2. Какие стандарты входят в семейство IMT – 2000?
3. Перечислите и охарактеризуйте стратегии перехода к 3G системам.
4. Поясните назначение элементов радиосети UMTS.
5. Какие режимы дуплексной передачи данных поддерживает технология WCDMA?
6. Поясните структуру кадра в нисходяще направлении в системах с WCDMA.
7. Какие основные различия радиointерфейсов WCDMA и GSM?
8. Каким образом производится распределение спектра в системах cdma2000?
9. Поясните суть технологий HSDPA и HSUPA.

6 Технологии передачи данных в сотовых системах четвертого поколения

6.1 Общие сведения

Четвертое поколение систем сотовой связи (4G) – перспективное поколение, характеризующееся высокой скоростью передачи данных и повышенным качеством голосовой связи. К четвёртому поколению принято относить перспективные технологии, позволяющие осуществлять передачу данных со скоростью до 100 Мбит/с для подвижных абонентов и до 1 Гбит/с для стационарных.

С технической точки зрения, основное отличие сетей четвёртого поколения от третьего заключается в том, что технологии систем 4G полностью основаны на протоколах пакетной передачи данных, в то время как системы 3G соединяет в себе передачу голосового трафика и пакетную передачу.

К числу главных достоинств 4G относится *глобальный роуминг*, а также *связь корпоративных сетей*, что будет весьма кстати для больших предприятий. Кроме видеозвонков станет доступным также и мобильное телевидение высокой чёткости.

Развитие технологий систем 4G идет по двум основным направлениям: технологии объединений 3GPP/3GPP2 (LTE Advanced) и технологии WiMAX (стандарты консорциума WiMAX).

Требования, предъявляемые к системам 4G, можно выполнить, если спектр сигнала расширить (по сравнению с системами 3G) в четыре раза (с 5 до 20 МГц) и применить технологию MIMO.

Рассмотрим технологии, применяемые в системах сотовой связи 4G для высокоскоростной передачи данных.

6.2 Технологии передачи данных в системах сотовой связи 4G

6.2.1 Технология OFDM

Рассмотрим технологию **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональное частотное разделение с мультиплексированием), которая применяется в системах сотовой связи 4G.

Одним из ключевых преимуществ технологии OFDM является сочетание высокой скорости передачи с эффективным противостоянием многолучевой интерференции.

Известным способом борьбы с интерференционными замираниями в системах радиосвязи является метод, когда спектр исходного сигнала разделяется на N частотных подканалов.

Этот метод в технике передачи данных известен как метод передачи данных с использованием множества несущих (Multi Carrier Modulation). Рассмотрим суть этого метода [14]. При этом поток исходных информационных символов

разбивается на блоки, содержащие N символов. Далее блок последовательных информационных символов преобразуется в блок параллельных символов.

Полоса занимаемых частот каждым из N подканалов (п/к):

$$\Delta F_{n/k} = \Delta F / N,$$

где ΔF – рабочая полоса частот.

При многолучевом распространении замирания обусловлены разностью хода лучей и суммированием сигналов в точке приема с разными фазами:

$$\Delta\varphi_i = \Delta F_i \Delta\tau = \Delta F_i (\tau_i - \tau_p),$$

где τ_i и τ_p – время распространения в i – м отраженном луче и прямом луче.

Отсюда следует, что чем меньше полоса частот, занимаемая каналом, тем меньше разность набега фаз $\Delta\varphi_i$. Для отдельного подканала набег фаз:

$$\Delta\varphi_{i\ n/k} = \Delta\varphi_i / N = (\Delta F \Delta\tau) / N.$$

В частности, если $\Delta\varphi_i = \pi$ (т. е. наблюдаются замирания), то выбором числа подканалов можно добиться, чтобы

$$\Delta\varphi_{i\ n/k} = 0.$$

В этом случае замирания будут отсутствовать.

$$T_c = T_0 N.$$

Структура многочастотного сигнала показана на рисунке 6.1.

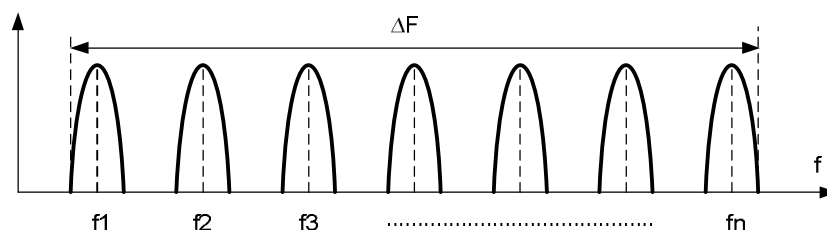


Рисунок 6.1 - Структура многочастотного сигнала

Однако при данном способе деления рабочей полосы частот на подканалы требуется наличие защитного интервала между подканалами с целью исключения межканальной интерференции. Поэтому выделенный диапазон частот используется недостаточно эффективно.

Поскольку в каждом из частотных подканалов скорость передачи данных можно сделать не слишком высокой, это создает предпосылки для эффективного подавления межсимвольной интерференции.

При частотном разделении каналов необходимо, чтобы ширина отдельного канала была, с одной стороны, достаточно узкой для минимизации искажения сигнала в пределах отдельного канала, а с другой – достаточно широкой для обеспечения требуемой скорости передачи. Кроме того, для экономного использования всей полосы канала, разделяемого на подканалы, желательно как можно более плотно расположить частотные подканалы, но при этом избежать

межканальной интерференции, чтобы обеспечить полную независимость каналов друг от друга. Частотные каналы, удовлетворяющие перечисленным требованиям, называются ортогональными. Несущие сигналы всех частотных подканалов (а точнее, функции, описывающие эти сигналы) ортогональны друг другу. С точки зрения математики ортогональность функций означает, что их произведение, усредненное на некотором интервале, должно быть равно нулю. В нашем случае это выражается простым соотношением [2]:

$$\int_0^T \sin 2\pi f_l t \sin 2\pi f_k t dt = 0, k \neq l,$$

где T – период символа, f_k, f_l – несущие частоты каналов k и l .

Ортогональность несущих сигналов можно обеспечить в том случае, если за время длительности одного символа несущий сигнал будет совершать целое число колебаний. Примеры нескольких несущих ортогональных колебаний представлены на рисунке 6.2 [14].

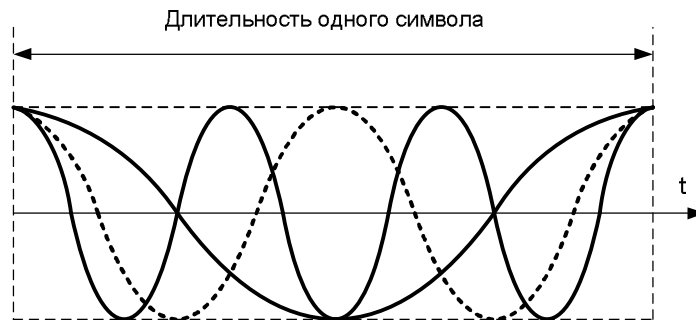


Рисунок 6.2 - Сигналы ортогональных несущих частот

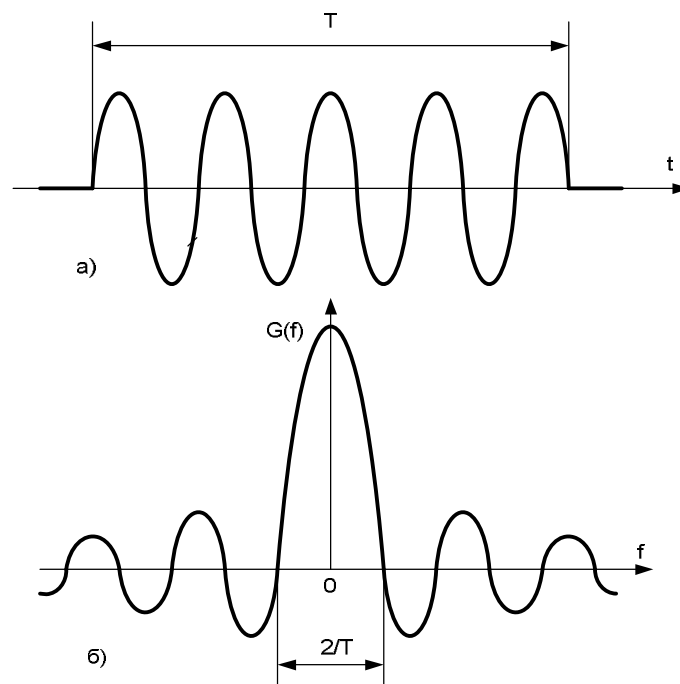


Рисунок 6.3 - Символ длительностью T (а) и его спектр (б)

Учитывая, что каждый передаваемый символ длительности T передается ограниченной по времени синусоидальной функцией, нетрудно найти и спектр такой функции (рисунок 6.3), который будет описываться функцией:

$$[\sin 2 \pi (f - f_i)] / [2 \pi (f - f_i)],$$

где f_i – центральная (несущая) частота i -го канала.

Такой же функцией описывается и форма частотного подканала. При этом важно, что хотя сами частотные подканалы могут и перекрывать друг друга, однако ортогональность несущих сигналов гарантирует частотную независимость каналов друг от друга, а, следовательно, отсутствие межканальной интерференции (рисунок 6.4).

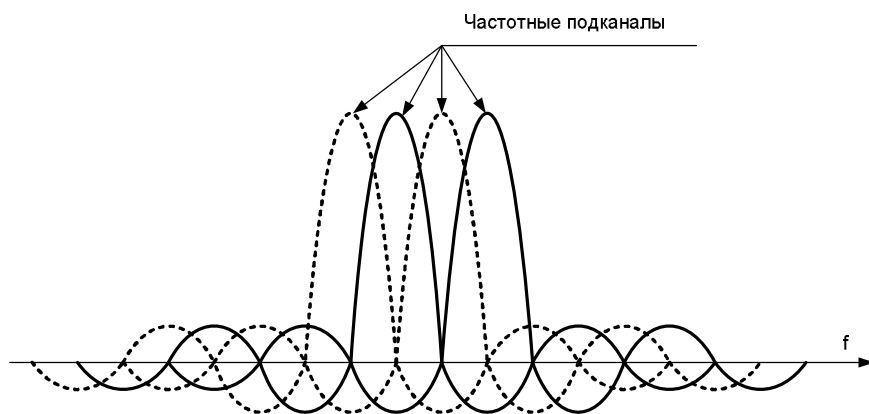


Рисунок 6.4 - Частотное разделение каналов с ортогональными несущими

Таким образом, **OFDM** характеризуется сильным перекрытием спектров соседних поднесущих, что позволяет уменьшить в два раза значение частотного разнеса и во столько же раз повысить плотность передачи цифровой информации (бит/с)/Гц. Благодаря ортогональному методу демодуляции поднесущих частот, происходит компенсация помех от соседних частот, несмотря на то, что их боковые полосы взаимно перекрываются.

Для выполнения условий ортогональности необходимо, чтобы частотный разнос между несущими был постоянен и точно равен значению $\Delta f = 1/T$, то есть на интервале T должно укладываться целое число периодов разностной частоты $f_2 - f_1$.

Группа несущих частот, которая в данный момент времени переносит биты параллельных цифровых потоков, называется «символом OFDM». Благодаря тому, что используется большое число параллельных потоков, длительность символа в параллельных потоках оказывается существенно больше, чем в последовательном потоке данных.

Неотъемлемой частью технологии OFDM является понятие защитного интервала – это циклическое повторение окончания символа, пристраиваемое в начале символа, т. е. в защитном интервале передается фрагмент полезного сигнала, что гарантирует сохранение ортогональности несущих принятого сигнала (но только в том случае, если эхо-сигнал при многолучевом распространении задержан не больше, чем на длительность защитного интервала) (рисунок 6.5).

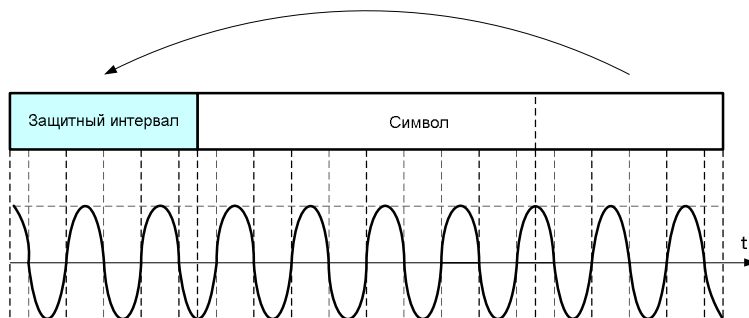


Рисунок 6.5 – Формирование защитного интервала

Защитный интервал является избыточной информацией. Наличие защитного интервала создает временные паузы между отдельными символами и если длительность защитного интервала превышает время задержки сигнала в результате многолучевого распространения, то межсимвольной интерференции не возникает (рисунок 6.6).

Это позволяет в декодере задержать оценку значений принятых символов на время, в течение которого изменения параметров радиоканала из-за действия эхо-сигналов прекратятся, и канал станет стабильным.

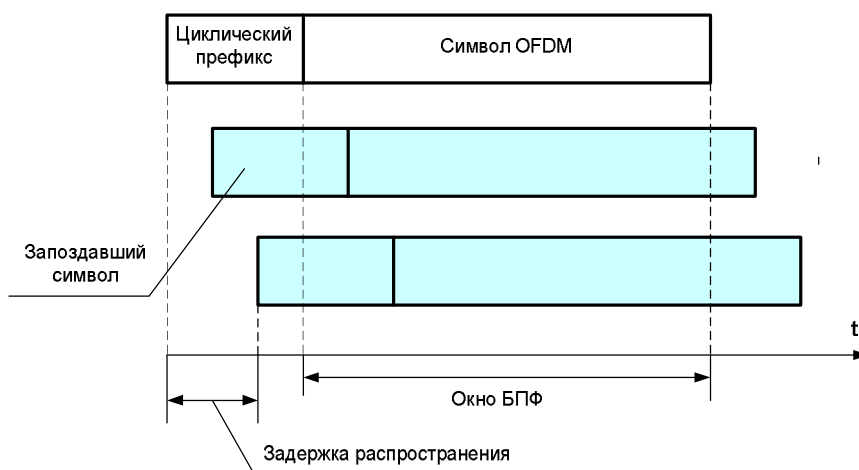


Рисунок 6.6 – Защитный интервал препятствует возникновению межсимвольной интерференции

Структура OFDM сигнала показана на рисунке 6.7.

Таким образом, при **OFDM** временной интервал сигнала делится на две части – защитный интервал, в течение которого оценка значения символа в декодере не производится, и рабочий интервал символа, за время которого принимается решение о значении принятого символа.

Кроме того, преимущество OFDM заключается в уменьшении необходимого количества временных защитных интервалов. При последовательном сигнале защитные интервалы добавляются между каждым символом, а при многочастотном – между группами символов (OFDM-символами).

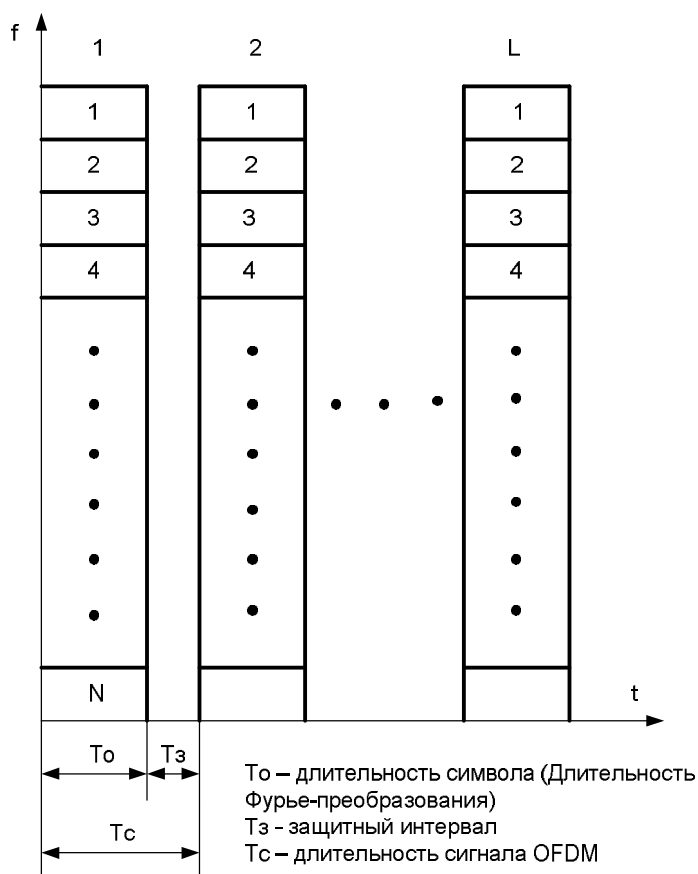


Рисунок 6.7 - Структура OFDM сигнала

Особенностью сигналов OFDM является:

1) мультиплексирование несущих колебаний (называемых поднесущими), модулированных информационными символами по выбранному закону (QPSK, 16QAM, 64QAM);

2) поднесущие ортогональны (взаимная корреляционная функция равна нулю), или, по крайней мере, квазиортогональны (на практике);

3) каждый OFDM-символ имеет защитный временной интервал для исключения межсимвольной интерференции. Этот защитный интервал выбирается с учетом импульсной характеристики линии связи (физической среды распространения радиосигнала).

Получение сигнала OFDM состоит из нескольких этапов и подробно рассмотрено в [14, 15].

На рисунке 6.8 показано частотно-временное представление OFDM [35].

На рисунке 6.9 приведены диаграммы, поясняющие принцип **OFDM** для простейшего случая двух субпоток и BPSK модуляции поднесущих.

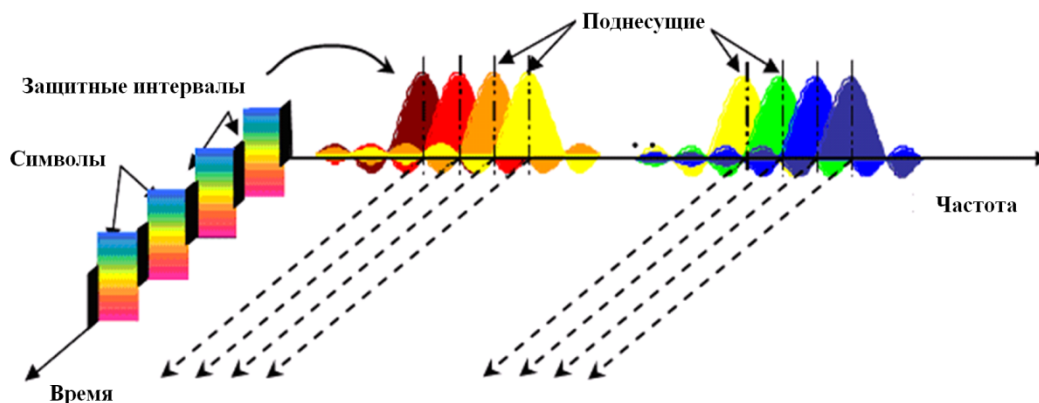


Рисунок 6.8 - Частотно-временное представление OFDM сигнала при ширине спектра 5 МГц

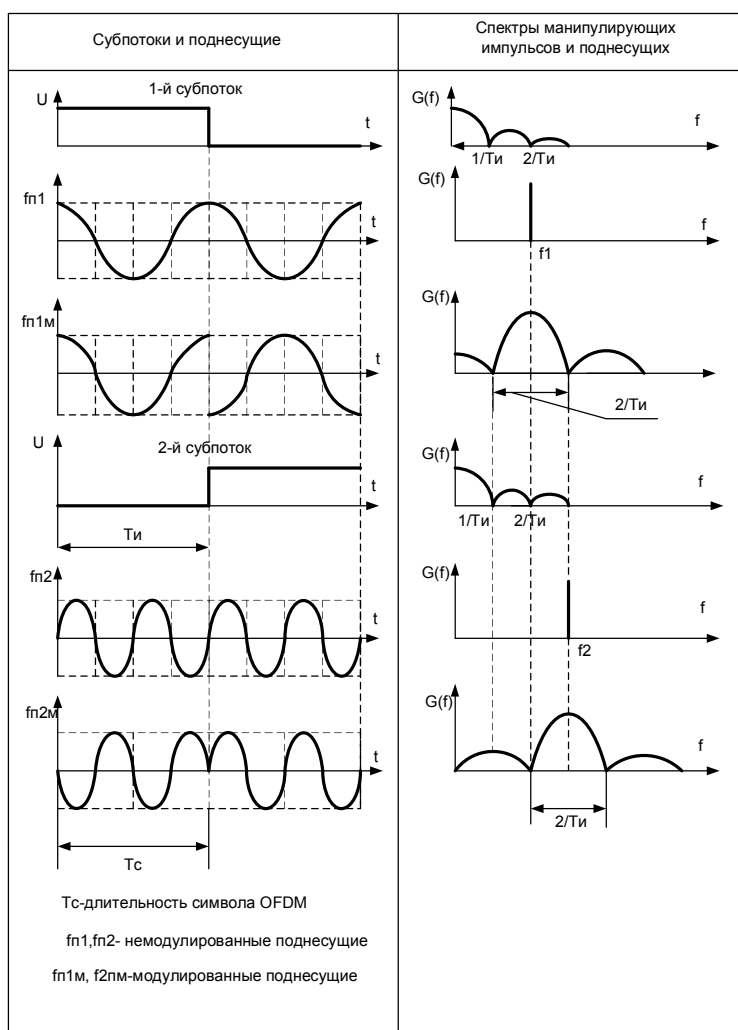


Рисунок 6.9 – Диаграммы, поясняющие принцип OFDM

Обобщенная схема формирования многочастотного сигнала приведена на рисунке 6.10.

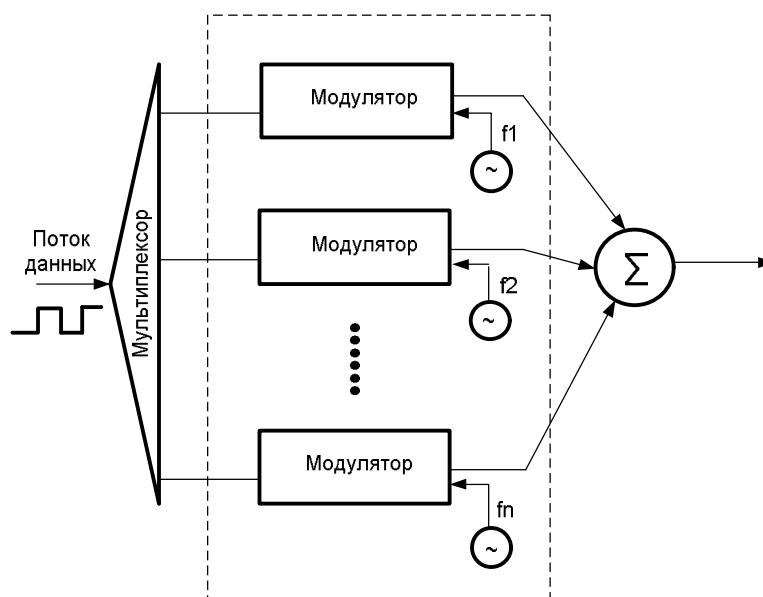


Рисунок 6.10 - Схема формирования многочастотного сигнала

На практике при формировании OFDM/QAM сигнала используется обратное быстрое преобразование Фурье на N точек, что значительно упрощает практическую реализацию приемопередающих устройств.

Вопросы практической реализации технологии OFDM рассмотрены в [12].

6.2.2 Технология MIMO

MIMO (*Multiple Input– Multiple Output* – множественный вход – множественный выход) – технология передачи данных с помощью N антенн и их приема M антеннами). Передающие и приемные антенны разнесены настолько, чтобы достичь слабой корреляции между соседними антеннами.

Это аббревиатура, которая идентифицирует один из 4 вариантов создания беспроводного канала с точки зрения его начала (input) и окончания (output). В случае радиоканала началом является передатчик, а окончанием – приемник радиосигнала. В таблице 6.1 (матрице) показаны возможные 4 варианта организации радиоканала.

Таблица 6.1 - Варианты организации радиоканала

	Single Input (один передатчик)	Multiple Input (несколько передатчиков)
Single Output (один приемник)	SISO	MISO
Multiple Output (несколько приемников)	SIMO	MIMO

Достоинства технологии MIMO связаны с использованием нескольких антенн [30].

Обозначение MIMO включает несколько технологий:

- использование «интеллектуальных антенн», позволяющих формировать узкую направленность передачи данных (лучи), устранять мешающие воздействия помех за счет их компенсации в приемном устройстве. Эта технология дает возможность как повысить помехоустойчивость канала связи, так и увеличить эффективность использования спектра за счет передачи данных в параллельных лучах;
- использование пространственно-временного кодирования (Space-Time Coding - STC);
- использование поляризационного разделения каналов, поляризационной обработки сигналов.

Все разновидности технологии MIMO направлены на достижение одной цели – увеличение пиковой скорости передачи данных в сетях связи за счет улучшения помехоустойчивости.

Технология MIMO в последнее десятилетие является одним из самых актуальных способов увеличения пропускной способности и емкости беспроводных систем связи.

Физический смысл возможности увеличения скорости передачи данных можно пояснить с помощью формулы Шеннона. Для однолучевого канала SISO справедливо выражение:

$$C_{\text{siso}} = f_s \log_2 (1 + S/N), \quad (6.1)$$

где f_s – ширина спектра сигнала, S/N – отношение сигнал/шум, C_{siso} – пиковая скорость передачи данных при заданных f_s и S/N .

Дальнейшее увеличение скорости передачи данных возможно за счет увеличения ширины спектра сигнала, увеличения отношения сигнал/шум, а также использования многопозиционных сигналов.

При использовании технологии MIMO пиковая скорость передачи данных определяется выражением:

$$C_{\text{MIMO}} = M f_s \log_2 (1 + S/N), \quad (6.2)$$

Здесь параметр M зависит от конфигурации MIMO:

$$M = \min [M_{\text{прд}}, M_{\text{пр}}],$$

где $M_{\text{прд}}$ – число передающих антенн, $M_{\text{пр}}$ – число приемных антенн.

Например, система связи с антенными системами, у которой $M_{\text{прд}} = 2$,

$M_{\text{пр}} = 3$ (конфигурация 2 x 3) или $M_{\text{прд}} = 2$, $M_{\text{пр}} = 4$ (конфигурация 2 x 4), эквивалентна системе связи с двумя пространственными потоками сигналов. Таким образом, $M = 2$.

Скорость передачи данных при технологии MIMO линейно увеличивается с увеличением числа антенн.

Для несимметричных антенных конфигураций MIMO (например, 1 x 2, или 2 x 1) скорость передачи данных $C_{\text{прд/пр}}$ имеет зависимость:

$$C_{\text{прд/пр}} = f_s \log_2 (1 + M (S/N)) \quad (6.3)$$

Работа систем MIMO базируется на механизме пространственно-временной обработки (Space-Time Processing – STP) сигналов [30]. В данном контексте под STP понимается адаптивная обработка сигналов системой, состоящей из нескольких антенных элементов, с использованием особенностей как пространственной, так и временной областей радиоканала. Вплоть до недавнего времени почти все разработки в области STP относились к базовым станциям или точкам доступа, но не к мобильным устройствам. Это происходило вследствие недостаточной вычислительной мощности для реализации STP-алгоритмов в мобильных устройствах и малой емкости батарей у последних. Однако прогресс не стоит на месте, и сегодня эти технологии уже доступны и для них.

Техника STP может применяться на передающем, приемном или на обоих концах канала. В первых двух случаях говорят о технологии интеллектуальных антенн (smart antenna). Если система использует интеллектуальные антенны на передающем конце канала, то ее называют Multiple Input Single Output (**MISO**), если на приемном – Single Input Multiple Output (**SIMO**).

Большинство традиционных систем на базе интеллектуальных антенн используют концепцию, известную как формирование диаграммы направленности. Узкая диаграмма направленности позволяет сфокусировать энергию сигнала в определенном направлении (обычно навстречу приемному устройству), что увеличивает отношение сигнал/шум. При узком антенном луче уменьшаются также помехи, улучшается отношение сигнал/помеха и, таким образом, повышается эффективность использования спектра.

Другие схемы, применяющие интеллектуальные антенны, улучшают качество канала за счет коэффициента усиления при приеме на разнесенные антенны. При многолучевом распространении сигнала уровень принимаемой мощности является случайной функцией, зависящей от местоположения пользователя, времени и текущего замирания сигнала. При использовании антенного массива вероятность потери сигнала всеми антеннами уменьшается экспоненциально с увеличением числа некоррелированных сигналов (или антенн). Схема разнесения в современных беспроводных сетях с системами MISO и SIMO использует простую коммутацию, чтобы выбрать (из двух) антенну с наивысшим отношением сигнал/шум.

Как следует из вышесказанного, в системах на базе интеллектуальных антенн (MISO и SIMO) скорость передачи данных не увеличивается, а улучшается только качество канала. Для того, чтобы повысить пропускную способность канала, необходимо применять STP (антенные массивы) как на передающем, так и на приемном его концах. Именно такие системы и называются MIMO. Заметим, что концепция MIMO была использована еще в начале

90-х в разработке Bell Labs, которая называлась BLAST – Bell Labs Layered Space-Time.

На рисунке 6.11 в качестве пояснения приведены упрощенные схемы возможных вариантов организации радиоканала.

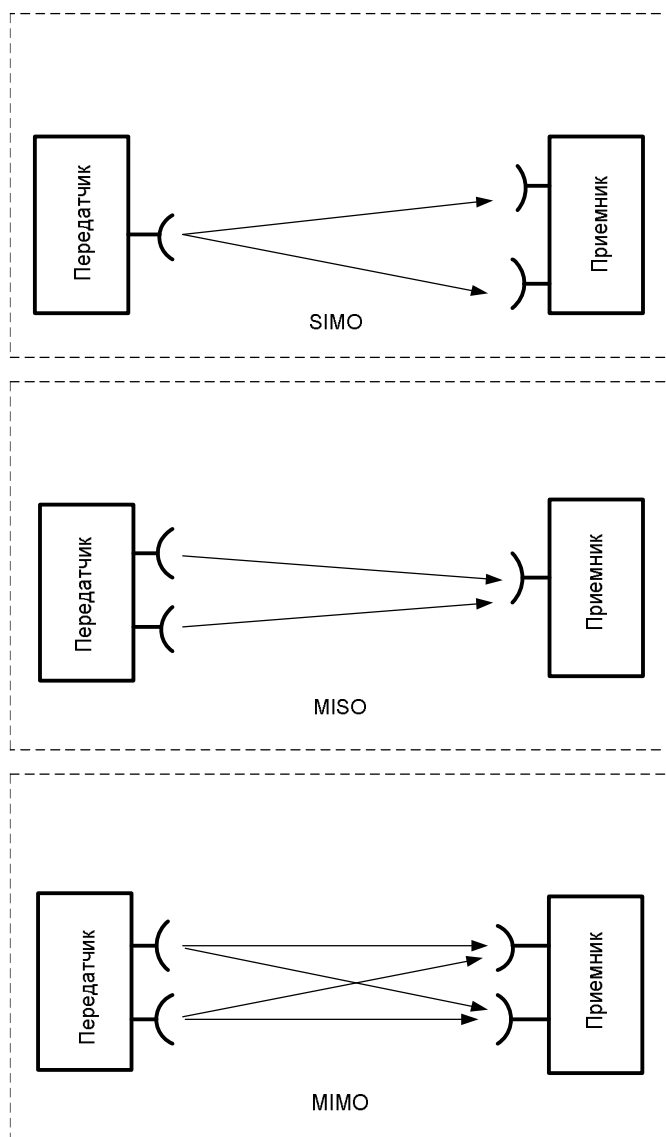


Рисунок 6.11 - Варианты организации радиоканала

В среде с многолучевым замиранием передаваемый сигнал, прежде чем достигнет приемника, рассеивается на различных объектах, таких, как стены, здания, деревья, горы. Этот, казалось бы, негативный эффект и применяется в системах MIMO для увеличения емкости канала. Система с M передающими и N принимающими антеннами способна обеспечить пиковую пропускную способность теоретически в M раз большую, чем обычные системы Single Input Single Output (SISO). Это достигается за счет того, что передатчик разбивает поток данных на независимые последовательности битов и пересылает их одновременно, используя массив антенн. Такая техника называется пространственным мультиплексированием (рисунок 6.12) [21].

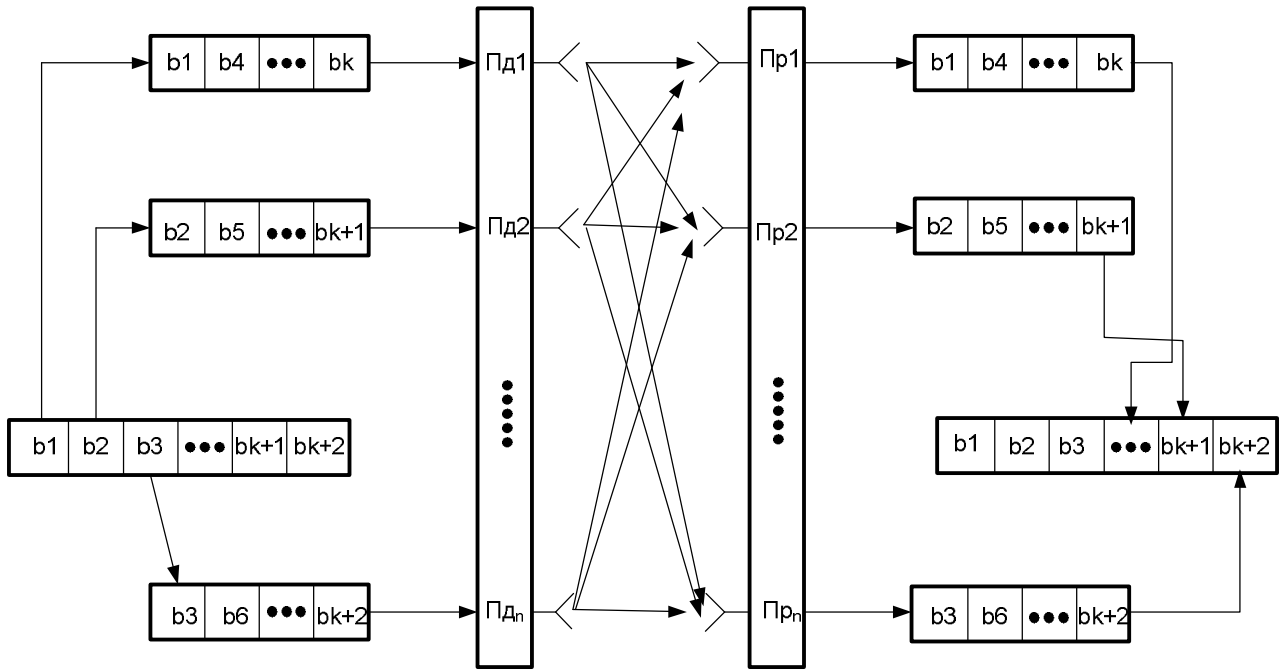


Рисунок 6.12 – Принцип реализации технологии MIMO

Передатчик в такой системе посылает N независимых сигналов, используя n антенн. На приемной стороне каждая из M антенн получает сигналы, которые являются суперпозицией n сигналов от всех передающих антенн. Таким образом, сигнал R_1 , принимаемый первой антенной, можно представить в виде [32]:

$$R_1 = h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n. \quad (6.4)$$

Записывая подобные уравнения для каждой приемной антенны, получим следующую систему:

$$\begin{aligned} R_1 &= h_{11}T_1 + h_{21}T_2 + \dots + h_{n1}T_n. \\ R_2 &= h_{12}T_1 + h_{22}T_2 + \dots + h_{n2}T_n. \\ &\dots \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$R_m = h_{1m}T_1 + h_{2m}T_2 + \dots + h_{nm}T_n.$$

Или, переписав данное выражение в матричном виде:

$$[R] = [H] \cdot [T],$$

где $[H]$ – матрица переноса, описывающая MIMO-канал связи.

Для того чтобы на приемной стороне декодер мог правильно восстановить все сигналы, он должен прежде всего определить коэффициенты h_{ij} , характеризующие каждый из $m \times n$ каналов передачи. Для определения коэффициентов h_{ij} в технологии MIMO используется преамбула пакета.

Определив коэффициенты матрицы переноса, можно легко восстановить переданный сигнал:

$$[T] = [H]^{-1} \cdot [R],$$

где $[H]^{-1}$ – матрица, обратная к матрице переноса $[H]$.

Отметим, что в технологии MIMO применение нескольких передающих и принимающих антенн позволяет повысить пропускную способность канала связи за счет реализации нескольких пространственно разнесенных подканалов, при этом данные передаются в одном и том же частотном диапазоне.

При передаче в одном частотном диапазоне каждая принимающая антенна «видит» все сигналы одновременно. Однако если многолучевое рассеяние достаточно велико, то подпотоки, передаваемые разными антеннами, рассеиваются несколько по-разному, поскольку последние разнесены в пространстве. Приемник, располагая после обработки настроечной последовательности необходимой информацией о каждом подканале, восстанавливает из отдельных подпотоков первоначальный поток данных.

Таким образом, многоэлементные антенные устройства обеспечивают:

- расширение зоны покрытия и сглаживание в ней мертвых зон;
- использование нескольких путей распространения сигнала;
- увеличение пропускной способности за счет формирования различных каналов (разделенных пространственно, с помощью ортогональных кодов, частот, поляризационных мод).

Существует три основных вида алгоритмов обработки сигналов на приемной стороне [30]:

- алгоритмы, основанные на методе максимального правдоподобия (ML, Maximum Likelihood);
- алгоритмы, основанные на методе минимальных среднеквадратичных отклонений (МСКО);
- алгоритмы, основанные на методе форсирования нуля (обнуления, zero forcing, ZF).

Также применяется разделение на ортогональные и неортогональные методы кодирования/декодирования. Основной задачей любого метода является поиск решений из числа всех возможных по наименьшему евклидову расстоянию между переданным символом и одним из возможных решений.

6.3 Принципы построения радиointерфейса по технологии LTE

LTE базируется на трех основных технологиях: мультиплексирование посредством ортогональных несущих OFDM, многоантенные системы MIMO и эволюционная системная архитектура сети (System Architecture Evolution) [5]. Принципиально, что дуплексное разделение каналов может быть как частотным (FDD), так и временным (TDD). Это позволяет операторам очень гибко использовать частотный ресурс (рисунок 6.13) [5]. Такое решение открывает путь на рынок тем компаниям, которые не обладают спаренными частотами. С другой стороны, поддержка FDD очень удобна для традиционных сотовых операторов,

поскольку у них спаренные частоты есть «по определению» – так организованы практически все существующие системы сотовой связи. Сама же по себе система FDD существенно более эффективна в плане использования частотного ресурса, чем TDD, – в ней меньше накладных расходов (служебных полей, интервалов и т. п.).

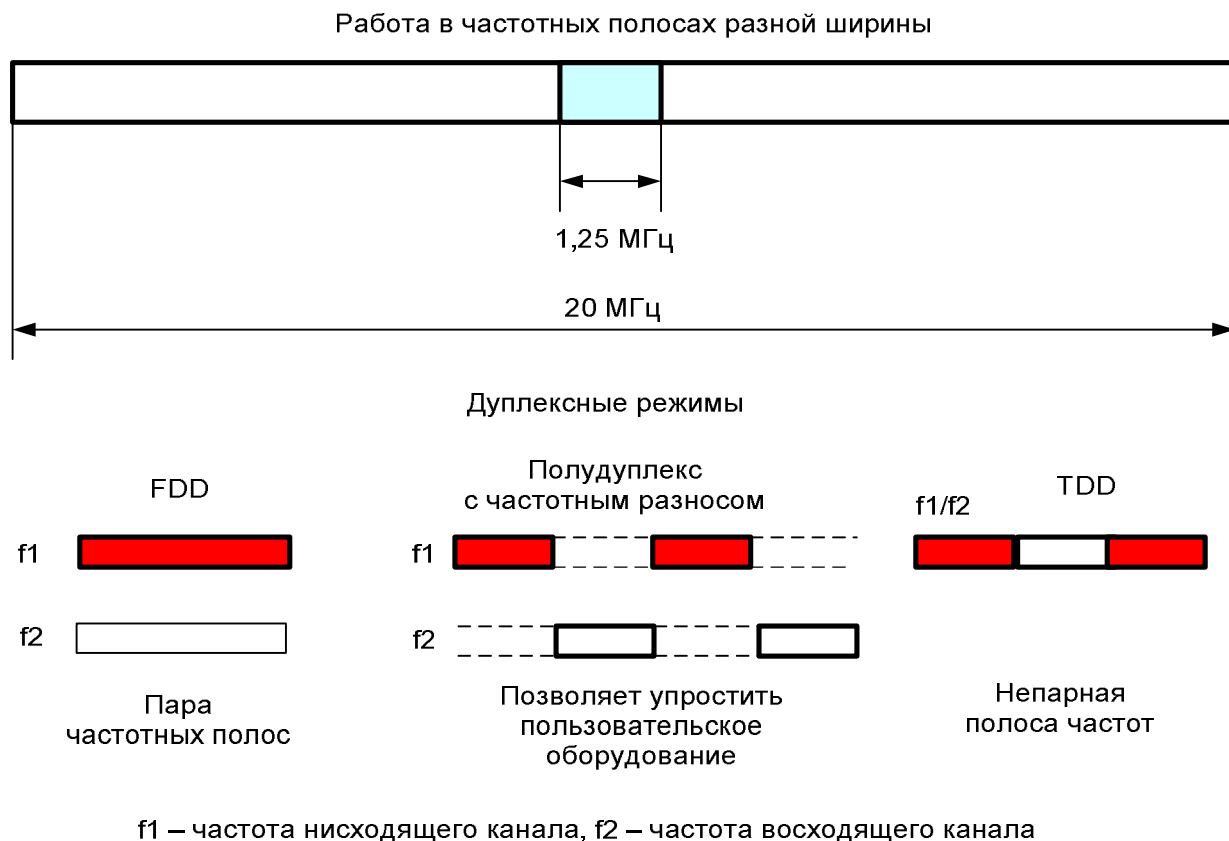


Рисунок 6.13 - Дуплексные режимы

Обмен между базовой станцией (БС) и мобильной станцией (МС) строится по принципу циклически повторяющихся кадров (в терминологии LTE – радиокадр). Длительность радиокадра – 10 мс. Все временные параметры в спецификации LTE привязаны к минимальному временному кванту:

$$T_s = 1 / (2048 \cdot \Delta f),$$

где Δf – шаг между поднесущими, стандартно – 15 кГц. Таким образом, длительность радиокадра – 307200 T_s .

Сам же квант времени соответствует тактовой частоте 30,72 МГц, что кратно стандартной в 3G-системах (WCDMA с полосой канала 5 МГц) частоте обработки 3,84 МГц ($8 \times 3,84 = 30,72$).

Стандарт LTE предусматривает два типа радиокадров. Тип 1 предназначен для частотного дуплексирования – как для полного дуплекса, так и для полуду-

плекса. Такой кадр состоит из 20 слотов (длительностью 0,5 мс), нумеруемых от 0 до 19 (рисунок 6.14) [14].

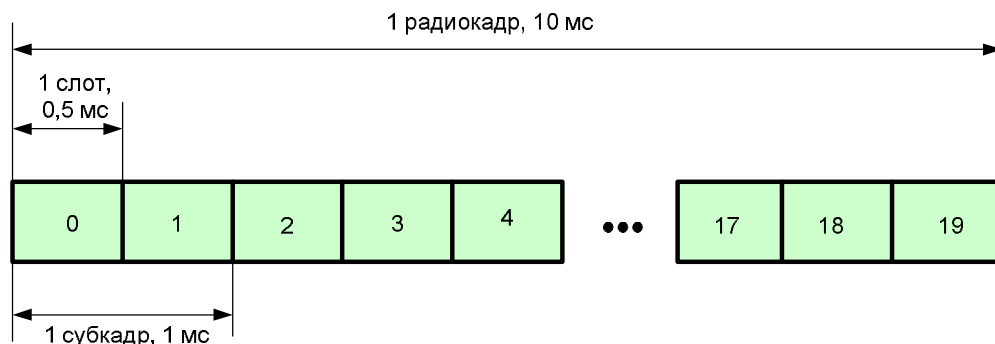


Рисунок 6.14 - Структура кадра LTE при частотном разделении дуплексных каналов

Два смежных слота образуют субкадр. При полнодуплексном режиме радиокадры в восходящем и нисходящем каналах передаются параллельно, но с оговоренным в стандарте временным сдвигом. Радиокадр типа 2 (рисунок 6.15) предназначен только для временного дуплексирования. Он состоит из двух полукадров длительностью по 5 мс.

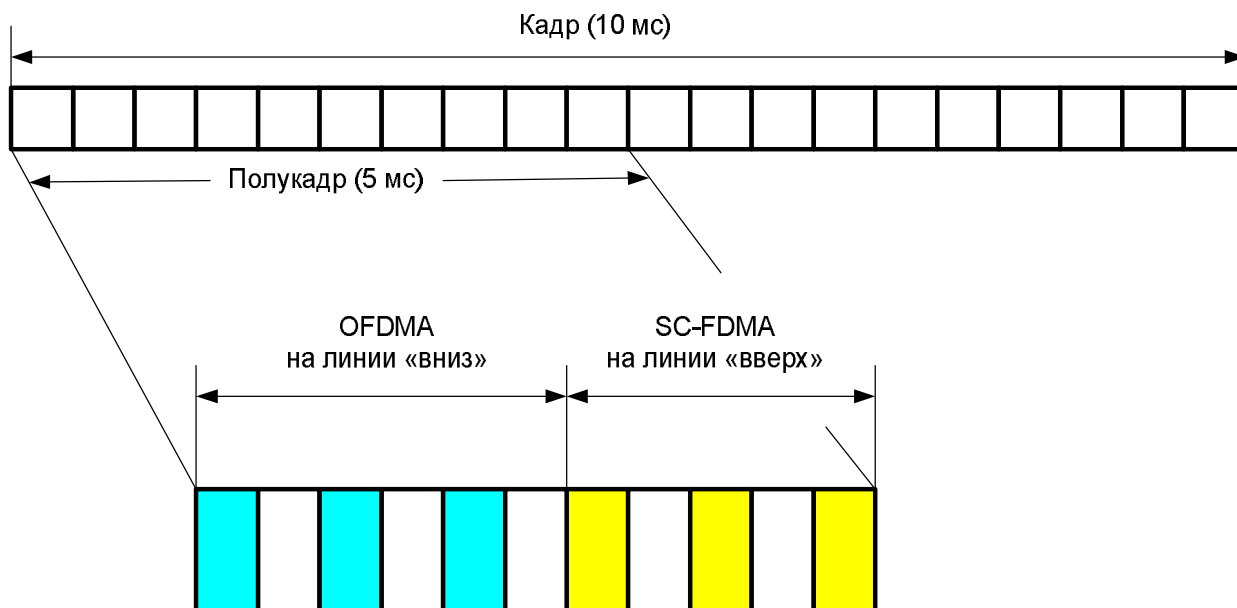


Рисунок 6.15 - Общая структура радиокадра при временном дуплексировании

Развернутая структура радиокадра приведена на рисунке 6.16.

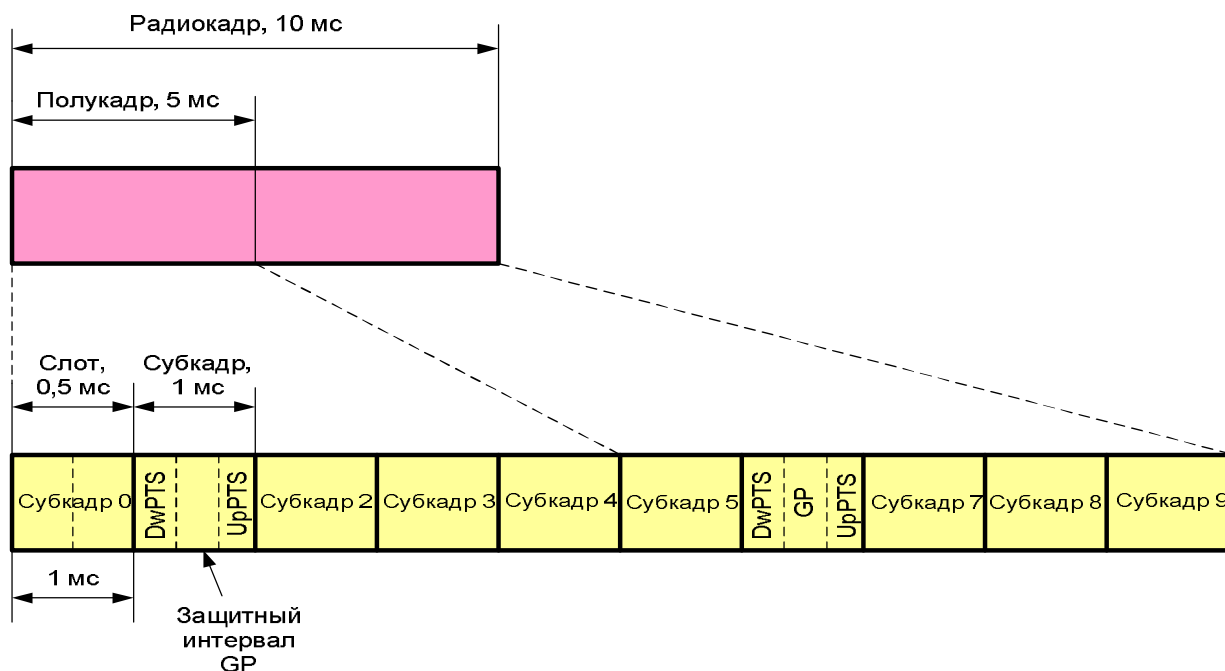


Рисунок 6.16 - Структура кадра LTE при временном разделении дуплексных каналов

Каждый полукадр включает 5 субкадров длительностью 1 мс. Стандарт предусматривает два цикла временного дуплексирования – 5 и 10 мс. В первом случае 1-й и 6-й субкадры идентичны и содержат служебные поля DwPTS, UpPTS и защитный интервал GP.

При 10-мс цикле TDD 6-й субкадр используется для передачи данных в нисходящем канале. Субкадры 0 и 5, а также поле DwPTS всегда относятся к нисходящему каналу, а субкадр 2 и поле UpPTS – к восходящему. Распределение остальных субкадров определяется таблице 6.2 [14].

Таблица 6.2 - Распределение субкадров в радиокadre типа 2

Конфигурация	Ц TDD, MC	НОМЕР СУБКАДРА									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

D – нисходящий канал, U – восходящий, S – субкадр со специальными полями

Возможны несколько вариантов длительности полей DwPTS, UpPTS и GP, но их сумма всегда равна 1 мс. Как уже отмечалось, в LTE используется OFDM, хорошо исследованная в системах DVB, Wi-Fi и WiMAX.

Напомним, технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих вида $S_k(t) = a_k \cdot \sin [2\pi \times (f_0 + k\Delta f)]$, расположенных с определенным шагом по частоте Δf . Один OFDM символ содержит набор модулированных поднесущих. Во временной области OFDM-символ включает поле данных (полезная информация) и так называемый циклический префикс CP (Cyclic Prefix) – повторно передаваемый фрагмент конца предыдущего символа. Назначение префикса – борьба с межсимвольной интерференцией в приемнике вследствие многолучевого распространения сигнала. Отраженный сигнал, приходящий с задержкой, попадает в зону префикса и не накладывается на полезный сигнал.

В LTE принят стандартный шаг между поднесущими $\Delta f = 15$ кГц, что соответствует длительности OFDM-символа 66,7 мкс.

Каждому абонентскому устройству (АУ) в каждом слоте назначается определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области (рисунок 6.17) – ресурсная сетка [30]. 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 (т. е. 180 кГц) и 7 или 6 OFDM-символов, в зависимости от типа циклического префикса (таблица 6.3) – так, чтобы общая длительность слота составляла 0,5 мс.

Для систем сотовой связи в условиях города этого обычно вполне достаточно. Если же нет – используется расширенный префикс, обеспечивающий подавление межсимвольной интерференции в ячейках радиусом до 120 км.

Такие огромные ячейки полезны для разного рода широкополосных сервисов (MBMS), таких как мобильное ТВ-вещание. Для этих же режимов (только в нисходящем канале) предусмотрена особая структура слота, с шагом между поднесущими 7,5 кГц и циклическим префиксом 33,4 мкс. В слоте при этом всего три OFDM-символа. Особый случай широкополосного сервиса представляет режим MBSFN (мультимедийный широкополосный сервис для односторонней сети). В этом режиме несколько БС в определенной MBSFN-зоне одновременно и синхронно транслируют общий широкополосный сигнал.

Число ресурсных блоков NRB в ресурсной сетке зависит от ширины полосы канала и составляет от 6 до 110 (ширина частотных полос восходящего/нисходящего каналов в LTE – от 1,4 до 20 МГц). 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. Длительность префикса 4,7 мкс позволяет бороться с задержкой отраженного сигнала, прошедшего путь на 1,4 км больше, чем прямо распространяющийся сигнал.

Формирование OFDM-сигнала с заданной с заданной шириной спектра осуществляется путем стыковки нескольких блоков NRB (таблица 6.4). Распре-

деление блоков между абонентскими станциями выполняется базовыми станциями. Из рисунка 6.17 следует, что передаваемый сигнал на линии «вниз» определяется количеством поднесущих в полосе канала и длительностью OFDM – символов.

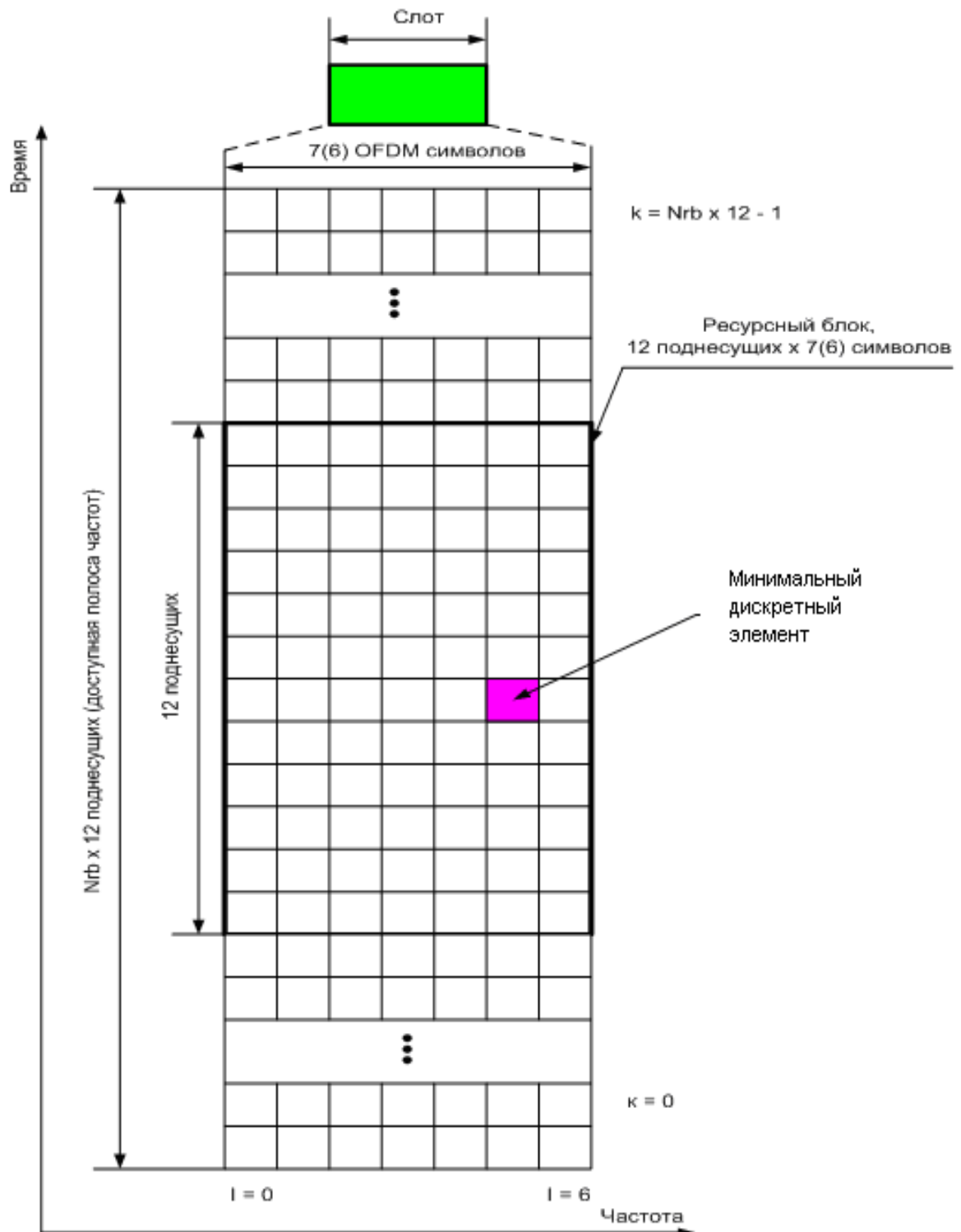


Рисунок 6.17 - Ресурсная сетка LTE при стандартном шаге поднесущих $\Delta f = 15$ кГц

Таблица 6.3- Физический префикс в нисходящем канале при $\Delta f = 15$ кГц

ТИП ПРЕФИКСА	ДЛИНА ПРЕФИКСА		ДЛИНА СЛОТА OFDM СИМВО- ЛОВ
	Ts	мкс	
Стандартный:			7
Первый символ слота	160	5,2	
Остальные 6 символов слота	144	4,7	
Расширенный	512	16,7	6

Таблица 6.4 – Значения параметров формирования OFDM – сигнала
на линии «вниз»

Параметр	Значения параметров					
Ширина спектра сигнала, МГц	1,4	3	5	10,0	15,0	20,0
Частотное разнесение под- несущих, кГц	15					
Ширина спектра блока Nrb, кГц	180					
Количество блоков Nrb	6	15	25	50	75	100

Каждая поднесущая модулируется посредством 4-, 16- и 64-позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QPSK, 16-QAM или 64-QAM). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит.

При стандартном префиксе символьная скорость составит 14000 символов/с, что соответствует, при FDD-дуплексе, агрегатной скорости от 28 до 84 кбит/с на поднесущую. Сигнал с полосой 20 МГц содержит 100 ресурсных блоков или 1200 поднесущих, что дает общую агрегатную скорость в канале от 33,6 до 100,8 Мбит/с.

Спецификации LTE определяют несколько фиксированных значений для ширины восходящего и нисходящего каналов между БС и АС (в сетях E-UTRA) (таблица 6.5) [14]. 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:

$$Fs = \Delta f \cdot N.$$

При заданных в стандарте значениях она оказывается кратной 3,84 МГц – стандартной частоте выборок в технологии WCDMA. Это очень удобно для создания многомодовых устройств, поддерживающих как WCDMA, так и LTE.

Таблица 6.5 - Параметры канала передачи между БС и АУ

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 не- сущих для БПФ	128	256	512	1025	1536	2048
Тактовая частота для БПФ, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

6.3.1 Особенности технологии OFDM в нисходящем канале

В нисходящем и восходящем каналах применение технологии OFDM различно. В нисходящем канале эта технология используется не только для передачи сигнала, но и для организации множественного доступа (OFDMA) – т. е. для мультиплексирования абонентских каналов. Помимо описанного физического структурного блока вводится понятие логического структурного блока. По числу ресурсных элементов они эквивалентны, однако возможно два варианта отображения ресурсных элементов физического блока в логический – один в один и распределенно. В последнем случае элементы логического ресурсного блока оказываются распределенными по всей доступной ресурсной сетке. В отличие от пакетных сетей, в LTE нет физической преамбулы, которая необходима для синхронизации и оценки смещения несущей. Вместо этого в каждый ресурсный блок добавляются специальные опорные и синхронизирующие сигналы. Опорные сигналы могут быть трех видов – опорный сигнал, характеризующий ячейку (Cell-specific), сигнал, связанный с конкретным абонентским устройством, и сигнал для специального широковещательного мультимедийного сервиса MBSFN. Опорный сигнал служит для непосредственного определения условий в канале передачи (поскольку приемнику известно его месторасположение и исходная форма). На основе этих измерений можно определить реакцию канала для остальных поднесущих и с помощью интерполяции восстановить их исходную форму. Опорный cell-specific-сигнал должен присутствовать в каждом субкадре нисходящего канала (кроме случаев MBSFN-передачи). Форма сигнала определяется на основе псевдослучайной последовательности Голда (вариант m-последовательности), при инициализации которой используется идентификационный номер ячейки БС (Cell ID).

Такой опорный сигнал равномерно распределен по ресурсным элементам (рисунок 6.16) [14]. Так, при стандартной длине префикса он транслируется в

0-м и 4-м OFDM-символе, при расширенном CP – во время 0-го и 3-го OFDM-символа. В частотной области опорные сигналы передаются через каждые шесть поднесущих, причем смещение определяется идентификатором ячейки, взятым по модулю 6. Помимо опорных сигналов, в нисходящем канале транслируются и синхронизирующие сигналы. Синхронизирующие сигналы также однозначно определяют Cell ID. В LTE принята иерархическая структура идентификации ячейки, как и в предшествующей ей технологии WCDMA. Предполагается, что на физическом уровне доступно 504 Cell ID. Они разбиты на 168 ID-групп, по три идентификатора в каждой. Номер группы N1(0–167) и номер идентификатора в ней N2 (0–2) однозначно определяют ID ячейки. Используется два синхросигнала – первичный и вторичный. Первичный синхросигнал представляет собой 62-элементную последовательность в частотном плане, задаваемую последовательностью Задова-Чу на основе идентификатора N2. Такая последовательность из 62 поднесущих, распределенных по ресурсной сетке симметрично относительно ее центральной частоты, передается в радиокадре типа 1 в последнем OFDM-символе слотов 0 и 10 (субкадры 0 и 5).

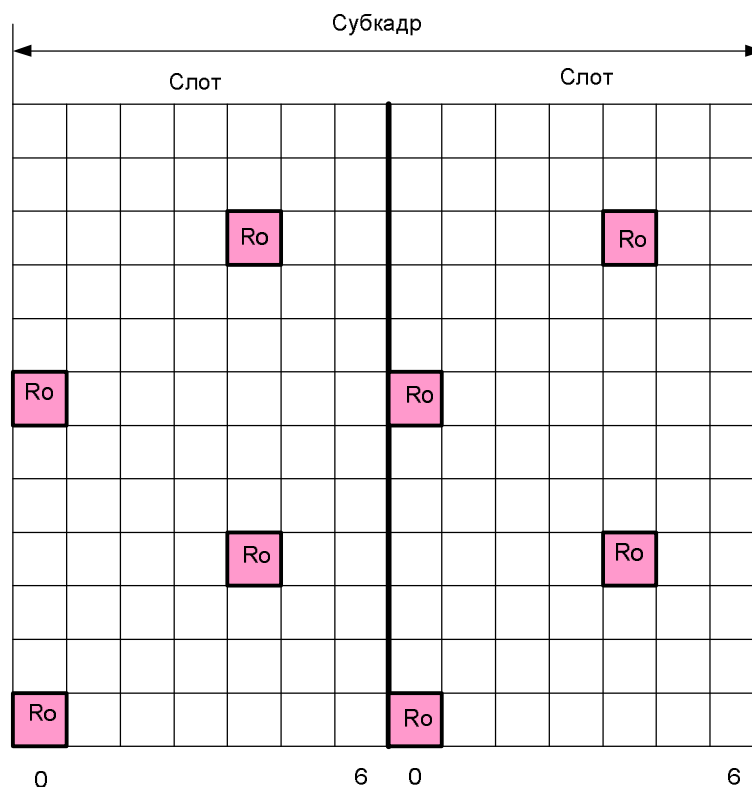


Рисунок 6.16 - Расположение опорного сигнала (cell-specific) в нисходящем канале ресурсной сетки LTE в случае работы с одной антенной

В радиокадре типа 2 для передачи первичного синхросигнала используется третий OFDM-символ субкадров 1 и 6.

Вторичный синхросигнал генерируется на основе номера ID-группы N1. Он передается в слотах 0 и 10 радиокадра типа 1 (пятый OFDM-символ при стан-

дартном CP) и в слотах 1 и 11 радиокadra типа 2 (шестой OFDM-символ при стандартном CP).

6.3.2 Формирование сигнала в нисходящем канале

Формирование сигнала в нисходящем канале достаточно стандартно для современных систем цифровой передачи информации (рисунок 6.17) [14].

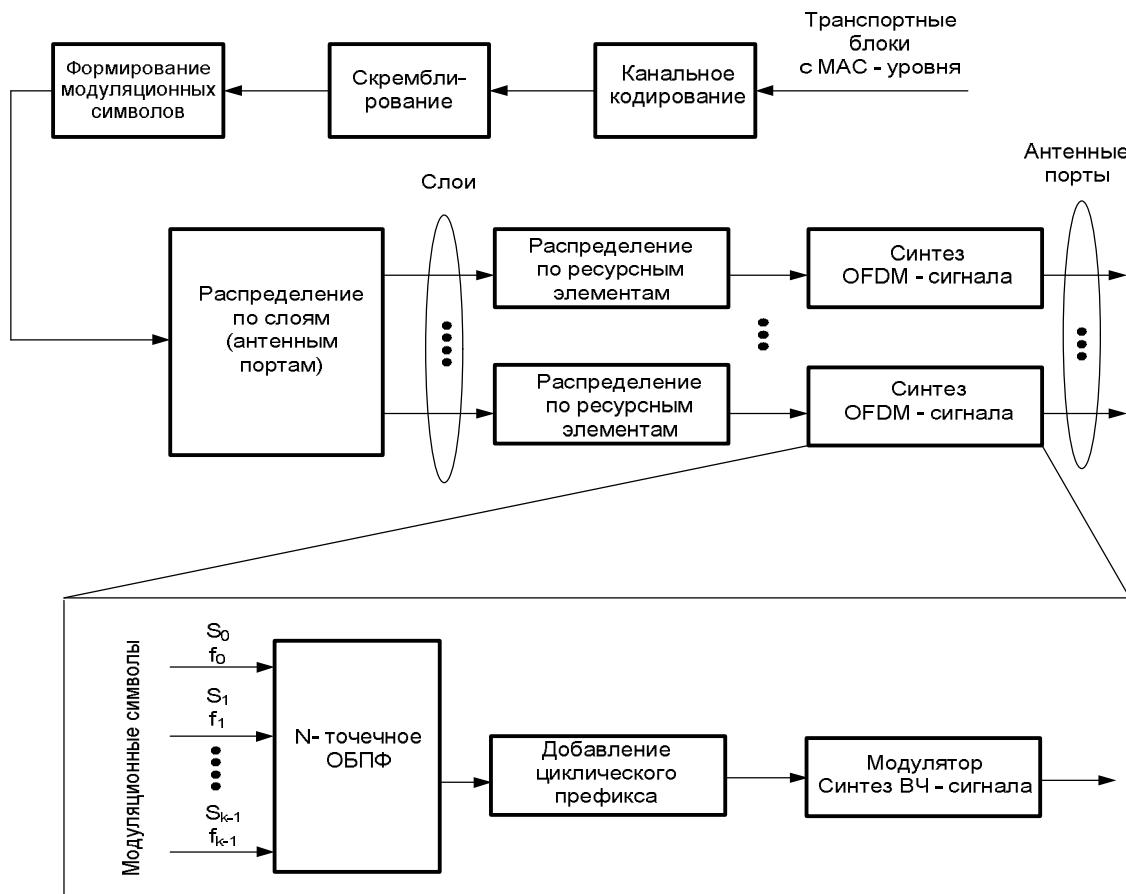


Рисунок 6.17 - Схема формирования сигнала в нисходящем канале

Оно включает процедуры канального кодирования, скремблирования, формирования модуляционных символов, их распределения по антенным портам и ресурсным элементам и синтеза OFDM-символов. Канальное кодирование подразумевает вычисление контрольных сумм (CRC-24) для блоков данных, поступающих с MAC-уровня.

Затем блоки с контрольными суммами обрабатываются посредством кодера со скоростью кодирования 1/3. В LTE предусмотрено применение либо сверточного кода, либо турбо-кода. Кодированная последовательность после перемежения (интерливинга) поступает в скремблер (для входной последовательности $\{x(i)\}$ выполняется процедура вида $dscr(i) = x(i) + c(i)$, где $c(i)$ – определенная скремблирующая последовательность). Затем формируются комплексные модуляционные символы (QPSK, 16- и 64-QAM) и распределяются по ресурсным элементам. Далее происходит синтез OFDM-символов, их последовательность поступает в модулятор, форми-

рующий выходной ВЧ-сигнал в заданном частотном диапазоне. На стороне приема все процедуры выполняются в обратном порядке.

6.3.3 Особенности технологии OFDM в восходящем канале

Применение OFDM в сочетании с циклическим префиксом делает связь устойчивой к временной дисперсии параметров радиоканала, в результате на приемной стороне становится ненужным сложный эквалайзер. Это очень полезно для организации нисходящего канала, поскольку упрощается обработка сигнала приемником, что снижает стоимость терминального устройства и потребляемую им мощность. В восходящем канале допустимая мощность излучения значительно ниже, чем в нисходящем. *Поэтому первичным становится энергетическая эффективность метода передачи информации с целью увеличения зоны покрытия, снижения стоимости терминального устройства и потребляемой им мощности.*

Основной недостаток технологии OFDMA – высокое соотношение пиковой и средней мощности сигнала (PAR). Это связано с тем, что во временной области спектр OFDM-сигнала становится аналогичным гауссову шуму, характеризующемуся высоким PAR. Кроме того, сама по себе технология OFDMA, с учетом необходимости минимизировать шаг между поднесущими и сокращать относительную длительность СР, предъявляет очень высокие требования к формированию композитного сигнала. Мало того, что частотные рассогласования между передатчиком и приемником и фазовый шум в принимаемом сигнале могут привести к межсимвольной интерференции на отдельных поднесущих (т. е. к интерференции между сигналами различных абонентских каналов). При малом шаге между поднесущими к аналогичным последствиям может привести и эффект Доплера, что очень актуально для систем сотовой связи, предполагающих высокую мобильность абонентов. *В связи с этим для восходящего канала LTE была предложена новая технология – SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access – множественный доступ с частотным разделением каналов и одной несущей).* Принципиальное ее отличие: если в OFDMA на каждой поднесущей одновременно передается свой модуляционный символ, то в SC-FDMA поднесущие модулируются одновременно и одинаково, но модуляционные символы короче. То есть в OFDMA символы передаются параллельно, в SC-FDMA – последовательно. Такое решение обеспечивает меньшее отношение максимального и среднего уровней мощности по сравнению с использованием обычной модуляции OFDM, в результате чего повышается энергоэффективность абонентских устройств и упрощается их конструкция (существенно снижаются требования к точности частотных параметров передатчиков).

Для мобильных устройств сигналы с большим PAR создают целый ряд проблем, связанных с конструкцией усилителя мощности и потреблением энергии от батарей. Именно поэтому 3GPP остановился на новой схеме передачи SC-FDMA.

SC-FDMA представляет собой гибридную схему передачи, которая сочетает низкие значения PAR, присущие системам с одной несущей, таким как GSM и CDMA, с большой длительностью символа и гибким распределением частот OFDM. Принципы генерации сигнала SC-FDMA показаны на рисунке 6.18, который является фрагментом одного из рисунков отчета 3GPP TR 25.814 об исследовании физического уровня LTE [40].

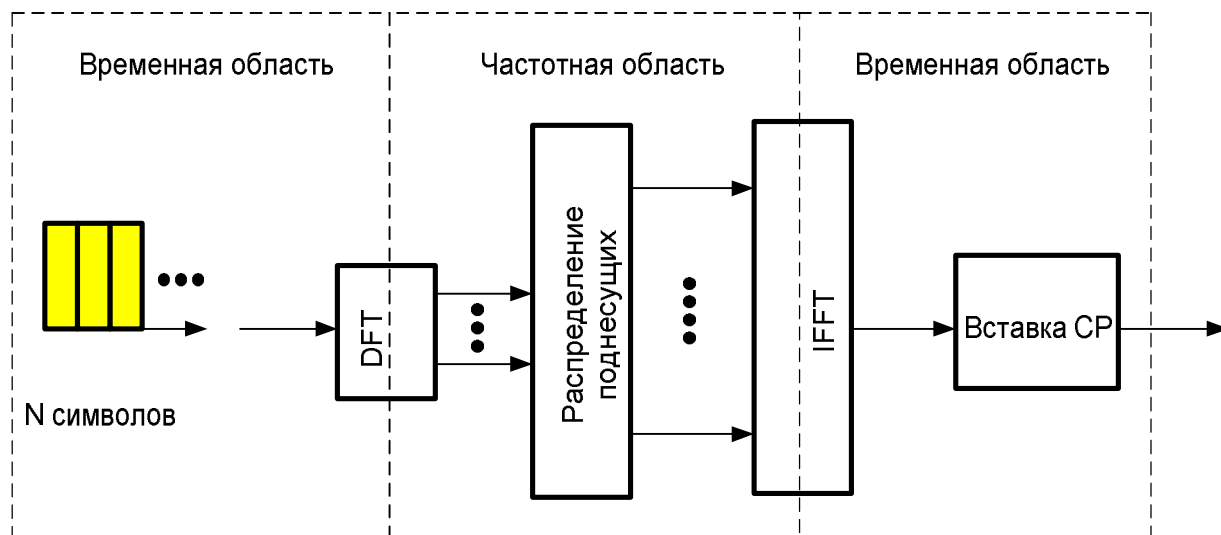


Рисунок 6.18 - Генерация сигнала SC-FDMA

В левой части рисунка 6.18 символы данных представлены во временной области. Символы преобразуются в частотную область с помощью быстрого преобразования Фурье и затем, в частотной области, они распределяются в нужные места общего спектра несущей. Затем их требуется снова преобразовать во временную область, чтобы перед передачей добавить к ним циклический префикс. *Альтернативное название технологии SC-FDMA – распределенная OFDM с дискретным преобразованием Фурье (DFT-SOFDM).*

Альтернативное описание этой технологии приведено на рисунке 6.19, где в частотной и временной областях показано, как OFDMA и SC-FDMA передают последовательность из восьми символов QPSK [26]. В этом упрощенном примере число поднесущих (M) было сокращено до четырех. Для OFDMA четыре (M) символа обрабатываются параллельно, причем каждый из них модулируется собственной поднесущей с соответствующей фазой QPSK. Каждый символ данных занимает полосу 15 кГц на время передачи одного символа OFDMA, которое равно 66,7 мкс. В начале следующего символа OFDMA вставляется защитный интервал, содержащий циклический префикс (CP). CP представляет собой копию конца символа, добавленную к началу символа. Благодаря параллельной передаче, символы данных имеют ту же длину, что и символы OFDMA.

В случае SC-FDMA символы данных передаются последовательно. Поскольку в данном примере используются четыре поднесущих, за один период символа SC-FDMA передаются четыре символа данных. Период символа SC-

FDMA имеет ту же длину, что и символ OFDMA, т. е. 66,7 мкс, но благодаря последовательной передаче символы данных получаются короче, т. е. равными $66,7/M$ мкс. В связи с повышением скорости следования символов для их передачи требуется более широкая полоса. В результате каждый символ занимает в спектре 60 кГц, а не 15 кГц, как было в случае более медленных символов, используемых в OFDMA. После передачи четырех символов данных вставляется СР.

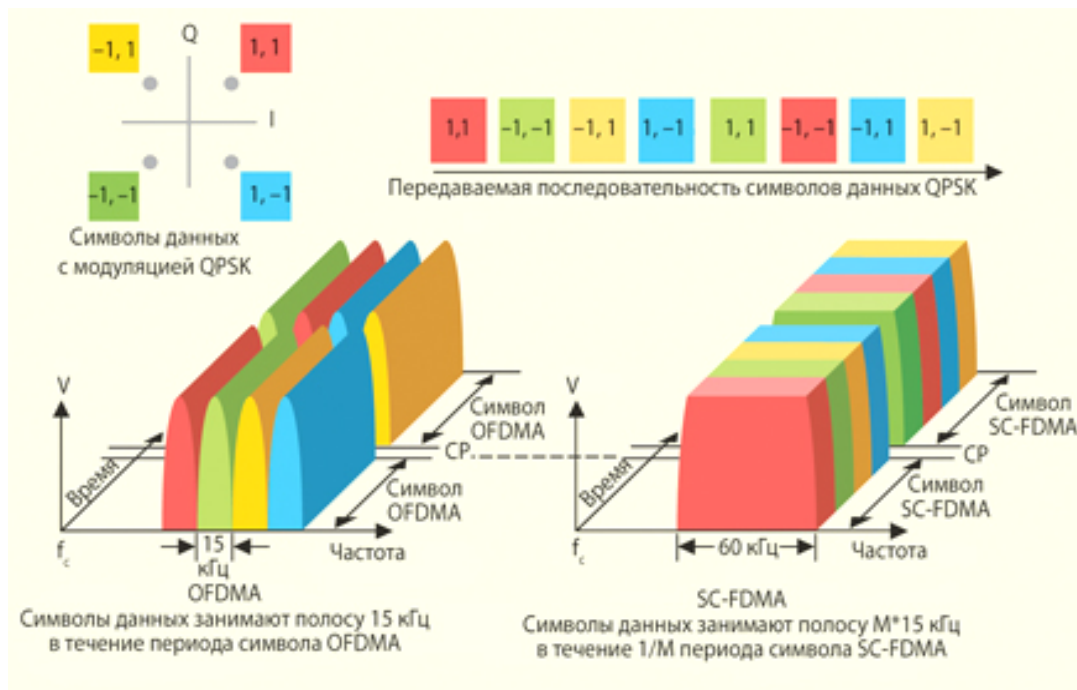


Рисунок 6.19 - Сравнение передачи серии символов данных QPSK в OFDMA и SC-FDMA

В продолжение графического сравнения OFDMA и SC-FDMA на рисунке 6.20 показан детальный процесс генерации сигнала SC-FDMA [14]. Сначала создается представление последовательности символа данных во временной области, как показано на рисунке 6.21. В данном примере с четырьмя поднесущими для генерации одного символа SC-FDMA требуются четыре символа данных. Используя первые четыре цветных символа QPSK (см. рисунок 6.19), процесс создает один символ SC-FDMA во временной области, рассчитывая траекторию, переходящую от одного символа данных QPSK к другому. Это делается со скоростью в M раз выше скорости символов SC-FDMA, так что в результате один символ SC-FDMA содержит M последовательных символов данных QPSK.

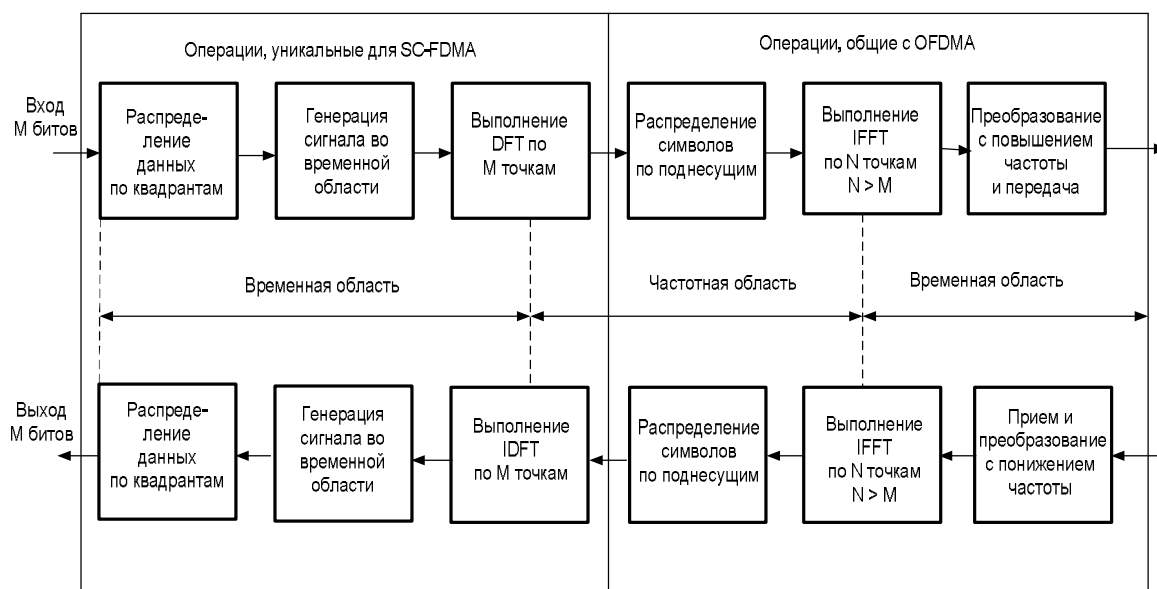


Рисунок 6.20 - Упрощенная модель генерации и приема SC-FDMA

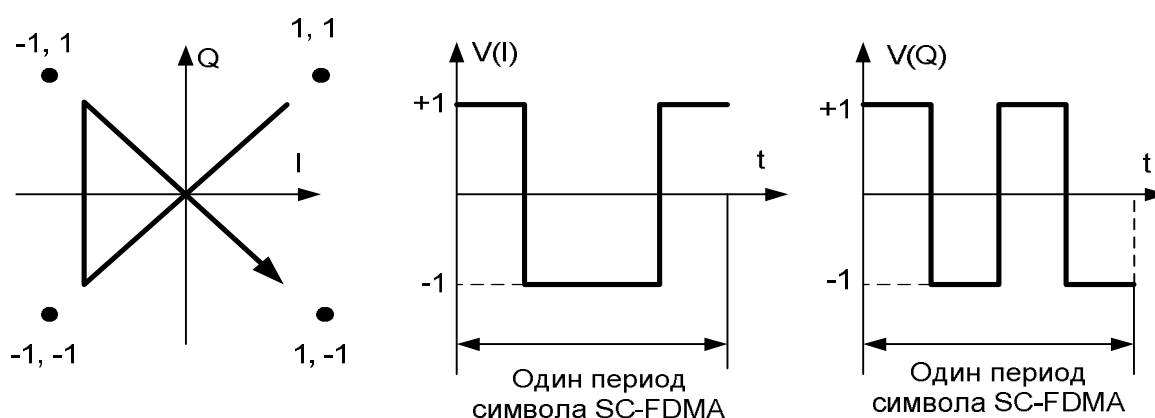


Рисунок 6.21 - Создание символа SC-FDMA во временной области

После создания IQ-представления одного символа SC-FDMA во временной области следующим шагом является представление его в частотной области с помощью дискретного преобразования Фурье. Частота дискретизации DFT выбирается таким образом, чтобы форма одного символа SC-FDMA во временной области полностью представлялась M бинами DFT, отстоящими друг от друга на 15 кГц, причем каждый бин представляет одну поднесущую с постоянной амплитудой и фазой в течение одного периода символа SC-FDMA равного 66,7 мкс. При этом всегда существует однозначное соответствие между числом символов данных, передаваемых за один период символа SC-FDMA, и числом создаваемых бинов DFT, которое, в свою очередь, равно числу занимаемых поднесущих. Это достаточно логично: с ростом числа символов данных, передаваемых за один период SC-FDMA, сигнал во временной области изменяется быстрее, что приводит к расширению полосы и, следовательно, требует

большого числа бинов DFT для полного представления сигнала в частотной области.

В OFDMA модулирующие символы данных остаются постоянными в течение периода символа OFDMA равного 66,7 мкс, тогда как символ SC-FDMA меняется со временем, поскольку содержит M коротких символов данных. Стойкость к многолучевому распространению процесса демодуляции OFDMA обусловлена большой длиной символов данных, которые накладываются непосредственно на отдельные поднесущие. К счастью, стойкость к разбросу задержки обусловлена именно постоянной природой каждой поднесущей, а не постоянством символов данных. Как показано выше, DFT изменяющегося во времени символа SC-FDMA создает набор бинов DFT, постоянных в течение символа SC-FDMA, несмотря на то, что модулирующие символы данных при этом изменяются. В этом и заключается основное свойство процесса DFT, что изменяющийся во времени символ SC-FDMA, состоящий из M последовательных символов данных, представляется в частотной области M не меняющимися во времени поднесущими. Таким образом, даже SC-FDMA с присущими ему короткими символами данных обладает достаточной стойкостью к многолучевому распространению. На рис. 6.19 все поднесущие SC-FDMA показаны с одной и той же амплитудой, но в реальных условиях каждая поднесущая имеет свою амплитуду и фазу в течение каждого символа SC-FDMA.

Теперь для завершения генерации сигнала SC-FDMA выполняются те же операции, что и для OFDMA. Обратное БПФ преобразует смещенный по частоте сигнал во временную область, а затем добавление CP обеспечивает свойственную OFDMA фундаментальную стойкость к многолучевому распространению.

Рисунок 6.19 [14] иллюстрирует близкую взаимосвязь между SC-FDMA и OFDMA. Темные блоки показывают обработку OFDMA, а светлые блоки представляют дополнительную обработку во временной области, необходимую для SC-FDMA. Главное, что следует отметить, это то, что сигнал, преобразованный из частотной области обратно во временную область, представляет собой не что иное, как смещенную по частоте версию последовательности символов QPSK. Данный пример демонстрирует основную причину создания SC-FDMA, а именно, PAR конечного сигнала не превышает PAR исходных символов данных, которые в данном случае являются символами QPSK. Это существенно отличается от OFDMA, где параллельная передача тех же символов QPSK создает статистические пики, очень похожие на Гауссовский шум, которые значительно превышают PAR исходных символов данных. Ограничение PAR с помощью SC-FDMA существенно снижает потребность в том, чтобы мобильное устройство работало с высокими пиками мощности. Это снижает и затраты, и энергопотребление.

Структура фрейма восходящего соединения приведена на рисунке 6.22 [14].

В восходящем соединении используются две структуры фрейма, одна для FDD типа 1 и другая – для FDD типа 2. Фрейм типа 1 имеет длительность 10 мс и состоит из десяти субфреймов, каждый из которых занимает два слота по 0,5 мс. Число символов в слоте зависит от длины CP. Для нормального CP в каж-

дом слоте содержится семь символов SC-FDMA. Для расширенного CP, который используется при большом разбросе задержки, в каждом слоте содержится шесть символов SC-FDMA. Опорные сигналы демодуляции передаются в четвертом символе каждого слота (т. е. в символе с номером 3). PUSCH может передаваться в любом другом слоте.

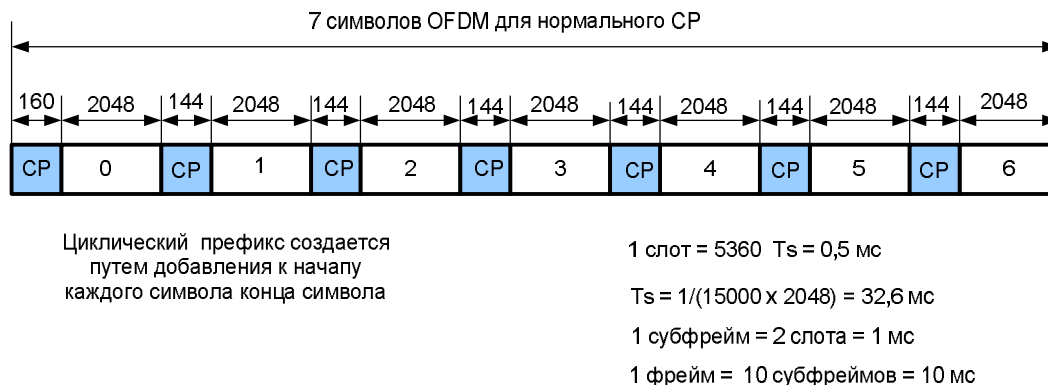


Рисунок 6.22 - Структура фрейма типа 1 для восходящего соединения

Сама процедура формирования SC-FDMA-сигнала отличается от схемы OFDMA. После канального кодирования, скремблирования и формирования модуляционных символов они группируются в блоки по M символов – субсимволов SC-FDMA (рисунок 6.23).

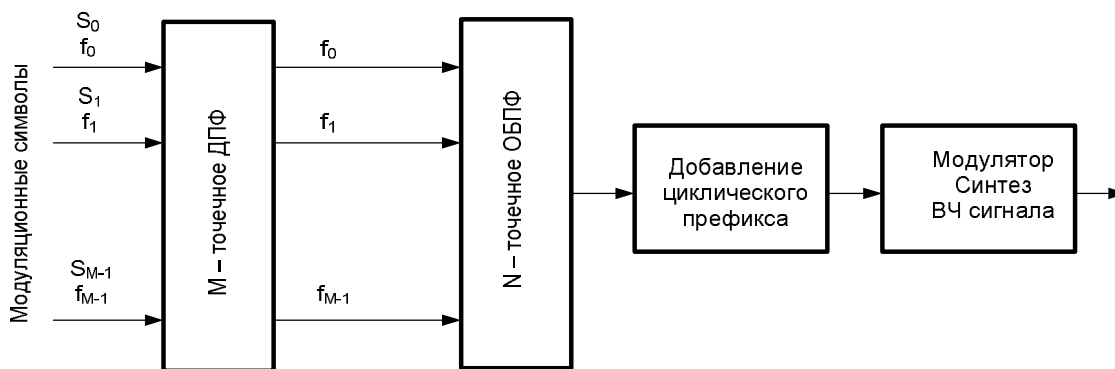


Рисунок 6.23 - Особенность формирования выходного сигнала в случае SC – FDMA

Очевидно, что непосредственно отнести их на поднесущие с шагом 15 кГц невозможно – требуется в N раз более высокая частота, где N – это число доступных для передачи поднесущих. Поэтому, сформировав группы по M модуляционных символов ($M < N$), их подвергают M -точечному дискретному Фурье-преобразованию (ДПФ), т. е. формируют аналоговый сигнал. А уже затем с помощью стандартной процедуры обратного N -точечного Фурье-преобразования синтезируют сигнал, соответствующий независимой модуля-

ции каждой поднесущей, добавляют циклический префикс и генерируют выходной ВЧ-сигнал.

В результате такого подхода передатчик и приемник OFDMA– и SC-FDMA-сигналов имеют схожую функциональную структуру.

При этом ресурсная сетка полностью аналогична нисходящему каналу. Также каждый физический ресурсный блок, соответствующий слоту, занимает 12 поднесущих с шагом $\Delta f = 15$ кГц в частотной области (всего 180 кГц) и 0,5 мс – во временной. Ресурсному блоку соответствуют 7 SC-FDMA– символов при стандартном циклическом префиксе и 6 – при расширенном.

Длительность SC-FDMA-символа (без префикса) равна длительности OFDMA-символа и составляет 66,7 мкс (длительности соответствующих циклических префиксов также равны).

Отметим, что АУ может использовать как фиксированный частотный диапазон (используются смежные ресурсные блоки, т. е. смежные поднесущие), так и распределенный – так называемый режим скачкообразной перестройки частоты (FH). В последнем случае для каждого слота восходящего канала используется новый ресурсный блок из доступной ресурсной сетки. Параметры перестройки частоты задаются сетевым оборудованием и сообщаются как при инициализации абонентской станции в сети, так и по ходу работы в канале управления. В случае распределенного способа информация от каждого абонента расположена во всем спектре сигнала (рисунок 6.24), поэтому данный способ устойчив к частотно-избирательному замиранию.

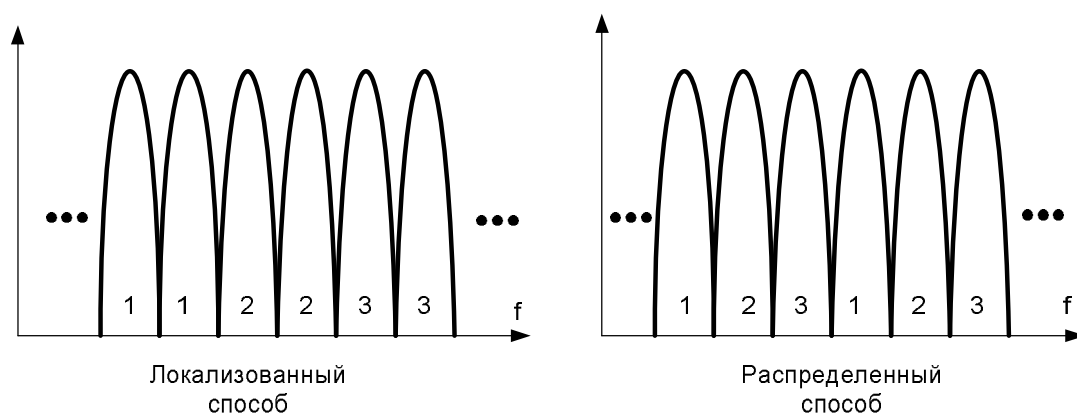


Рисунок 6.24 - Способы распределения поднесущих в SC – FDMA

С другой стороны, при локализованном способе распределения возможно определить полосу, в которой для данного абонента достигается максимальная устойчивость канала к замираниям. Поскольку области замирания сигнала для всех абонентов различны, то можно достичь общую максимальную эффективность использования радиоканала. Однако это требует непрерывного сканирования частотной характеристики канала для каждого устройства и организации функции диспетчеризации.

Помимо собственно информации, генерируемой функциями верхних уровней, в восходящем канале передаются опорные сигналы. Их назначение – помочь приемнику БС настроиться на определенный передатчик АУ. Кроме того, эти сигналы позволяют оценить качество канала, что используется в БС при диспетчеризации ресурсов.

Опорные сигналы в восходящем канале бывают двух видов – так называемые «демодулированные» и зондовые (sounding). Демодулированные опорные сигналы аналогичны опорным сигналам нисходящего канала. Они передаются на постоянной основе. Так, в общем информационном канале последовательность демодулированного опорного сигнала передается в четвертом SC-FDMA-символе каждого слота при стандартном СР.

Зондовые сигналы апериодичны. Их основное назначение – дать БС возможность оценить качество канала, если передача еще не ведется.

Радиоинтерфейс LTE предусматривает организацию передачи информационного потока на 1200-х поднесущих в полосе частот 20 МГц. При этом разнос поднесущих равен [14]:

$$\Delta f = 15 \text{ кГц.}$$

Длительность сигнала OFDM принята равной:

$$T_{\text{сигн}} = T_{\text{зи}} + T_{\text{с}},$$

где $T_{\text{зи}}$ – длительность защитного интервала, $T_{\text{с}}$ – длительность символа OFDM.

В LTE $T_{\text{с}} = 66,6 \text{ мкс}$, $T_{\text{зи}} = 4,7 \text{ мкс}$ (стандартный защитный интервал).

Отсюда $T_{\text{сигн}} = 71,3 \text{ мкс}$. Таким образом, символьная скорость в одном частотном подканале равна 14000 симв/с.

В таблице 6.6 приведены значения информационных скоростей в LTE для различных видов модуляции поднесущих, принятых в LTE [14].

Таблица 6.6 - Информационные скорости передачи информации в LTE

Вид модуляции поднесущих	Символьная скорость, симв/с	Число бит на символ	Информационная скорость на поднесущих, кбит/с	Информационная скорость исходного потока, Мбит/с
QPSK	14000	2	28	33,6
16 QAM		4	56	67,2
64 QAM		6	84	100,8

6.3.4 Применение технологии MIMO в LTE

Как и во всех современных технологиях беспроводной связи, в LTE поддерживаются многоантенные системы (MIMO). Учитывая ориентацию этой технологии на максимально простые абонентские устройства, техника MIMO в LTE максимально упрощена. Стандарт рассматривает MIMO-схемы с одной, двумя и четырьмя передающими и приемными антеннами в различных сочетаниях. В

ММО-системах есть два основных вида передачи – пространственное мультиплексирование и диверсифицированная передача. Первый режим означает, что каждый антенный канал транслирует независимый информационный поток. При этом сами каналы должны быть некоррелированными. Возможно два вида пространственно-мультиплексированной передачи – для одного АУ (SU-MIMO) и для группы АУ (MU-MIMO). В первом случае БС передает несколько независимых потоков данных одному АУ. При этом в АУ должно быть по крайней мере не меньше антенн, чем у БС. В MU-MIMO ресурсные элементы с одинаковыми частотно-временными параметрами должны приниматься различными АУ (при этом речь о цифровом формировании диаграммы направленности не идет). Принципиально, что одновременно по всем антенным каналам может передаваться только два кодовых слова (т. е. только два логически независимых информационных потока) [30].

Поэтому, несмотря на четыре возможных антенных канала, в режиме MU-MIMO БС в одном частотно-временном диапазоне способна работать только с двумя АУ.

Диверсифицированная передача означает, что несколько антенных каналов используются для передачи одного потока данных. Эта техника предназначена для борьбы с замираниями в радиоканале и направлена только на улучшение качества передачи в канале. На скорость передачи она влияет опосредованно, через повышение качества канала.

В восходящем канале возможна схема пространственного мультиплексирования множества абонентов MU-MIMO. Несколько АУ, каждое с одной антенной, могут использовать одинаковые частотно-временные ресурсы, но за счет декоррелированных антенных каналов БС работает со всеми ними одновременно.

Пространственное уплотнение позволяет передавать различные потоки информации совместно (одновременно) на тех же ресурсных блоках при использовании разнесенного пространства радио каналов. Передача информации может принадлежать как одному пользователю (SU-MIMO) так и нескольким пользователям (MU-MIMO). Пока SU-MIMO дает увеличение скорости передачи данных для одного пользователя, технология MU-MIMO позволяет увеличить общую емкость системы (число каналов). Пространственное уплотнение возможно только, если мобильный радиоканал поддерживает это.

Вместо увеличения скорости передачи или емкости, ММО можно использовать для разнеса и увеличения надежности передачи данных. План разнеса используется тот же, что и в WCDMA. Каждая передающая антенна существенно увеличивает количество переданной информации, поэтому ресивер принимает тот же самый опорный сигнал. Это улучшает соотношение сигнал/шум у приемной стороны и таким образом надежность передачи данных существенно возрастает при возникновении замираний. Типичный для такой системы недостаток в спецификации кодирования – это увеличенный эффект разброса.

Системы 4G, а именно LTE, предусматривают использование MIMO в конфигурации до 8x8. В теории это дает возможность передавать данные от базовой станции к абоненту со скоростью свыше 300 Мбит/сек. Также важным положительным моментом является устойчивое качество соединения даже на краю соты. При этом даже на значительном удалении от базовой станции, или при нахождении в глухом помещении будет наблюдаться лишь незначительное снижение скорости передачи данных.

6.4 Контрольные вопросы

1. Поясните суть технологии OFDM.
2. Какие частотные каналы называются ортогональными?
3. Поясните назначение защитного интервала в структуре OFDM-сигнала.
4. С какой целью применяется технология MIMO?
5. Какой смысл вкладывается в понятие «ресурсный блок»?
6. Дайте характеристику ресурсной сетке LTE.
7. Какой метод абонентского доступа применяется в нисходящем канале?
8. В чем заключаются отличия метода доступа в нисходящем и восходящем каналах LTE?

7 Спектральная эффективность систем мобильной связи

7.1 Общие сведения

Спектральная эффективность системы мобильной связи представляет собой показатель, определяемый как отношение скорости передачи данных на 1 Гц используемой полосы частот (бит/сек/Гц). Эта величина характеризует скорость передачи информации в заданной полосе частот. Спектральная эффективность является показателем эффективности использования частотного ресурса и в некоторых случаях – показателем качества услуг.

Увеличение спектральной эффективности с развитием технологий мобильной связи позволяет [30]:

- снизить расходы на использование выделенного диапазона частот;
- уменьшить затраты на приобретение, установку, электропитание и обслуживание базовых станций по отношению к количеству пользователей;
- увеличить емкость соты, что в свою очередь повышает пропускную способность системы в целом и влияет на качество обслуживания пользователей.

Но с ростом спектральной эффективности повышается общая стоимость системы мобильной связи и увеличивается вероятность ошибок при передаче данных. *Оптимальное соотношение между значениями указанных параметров является одним из наиболее важных факторов для операторов и производителей оборудования.*

Кроме традиционных подходов к оценке спектральной эффективности систем мобильной связи, существуют и другие подходы к расчету этого показателя, которые учитывают не только определенный канал связи, но и систему в целом, например:

- спектральная эффективность может рассчитываться как отношение скорости передачи данных всех абонентов сети в определенной географической области (зоне, соте) на 1 Гц полосы частот (бит/с Гц/сота или бит/с/Гц/зона обслуживания);
- спектральная эффективность может рассчитываться как отношение максимальной пропускной способности сети к ширине полосы одного канала (бит/с/Гц).

Учитывая потребности в более высокой пропускной способности и возможное увеличение радиочастотного спектра для сетей 3G, разработчики системы LTE предусмотрели использование канала связи с более широкой полосой частот, чем 5 МГц. В то же время для обеспечения большей гибкости (масштабируемости) системы LTE предусмотрена ширина полосы частот как более, так и менее 5 МГц (1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц).

7.2 Сравнительный анализ спектральной эффективности систем мобильной связи и широкополосного доступа

При сравнительном анализе спектральной эффективности систем мобильной связи необходимо учесть, что наборы параметров по умолчанию (диапазон частот, ширина полосы частот, разнос сот и т.д.) сравниваемых систем должны быть более или менее соизмеримыми. Такой подход обусловлен тем, что при изменении ширины полосы частот изменяются и предельные теоретические показатели Шеннона по скорости передачи информации в линиях связи. Например, при использовании для передачи данных полосы частот 10 МГц расчетное значение пропускной способности сети выше, чем при полосе 5 МГц.

Проведем сравнительный анализ спектральной эффективности систем мобильной связи на базе некоторых стандартов.

Значения спектральной эффективности сетей CDMA- EV – DO приведены в таблице 7.1[30].

Таблица 7.1- Значения спектральной эффективности сетей CDMA- EV – DO

Версия стандарта CDMA- EV – DO	Ширина полосы частот, МГц	Спектральная эффективность, бит/с/Гц	
		Линия «вниз»	Линия «вверх»
Release 0	1,25	1,9	0,12
Revision A	1,25	2,48	1,44
Revision B	1,25	3,92	-
	5	2,94	-
	20	2,3...3.67	1,35

Таблица 7.2 содержит данные по спектральной эффективности сетей стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.16 [30].

Таблица 7.2 – Значения спектральной эффективности сетей беспроводного широкополосного доступа

Версия стандарта CDMA- EV – DO	Ширина полосы частот, МГц	Спектральная эффективность, бит/с/Гц	
		Линия «вниз»	Линия «вверх»
802.11a	20	2,7	-
802.11b	20	0,55	-
802.11g	20	2,7	-
802.16a	20	до 3,75	-
802.11e	5	до 3,1	до 2,26
	10	до 3,1	до 2,3

На рисунках 7.1 – 7.3 приведены диаграммы спектральной эффективности трех различных систем мобильной связи и систем беспроводного широкополосного доступа, использующих каналы с шириной полосы частот 5, 10 и 20 МГц.

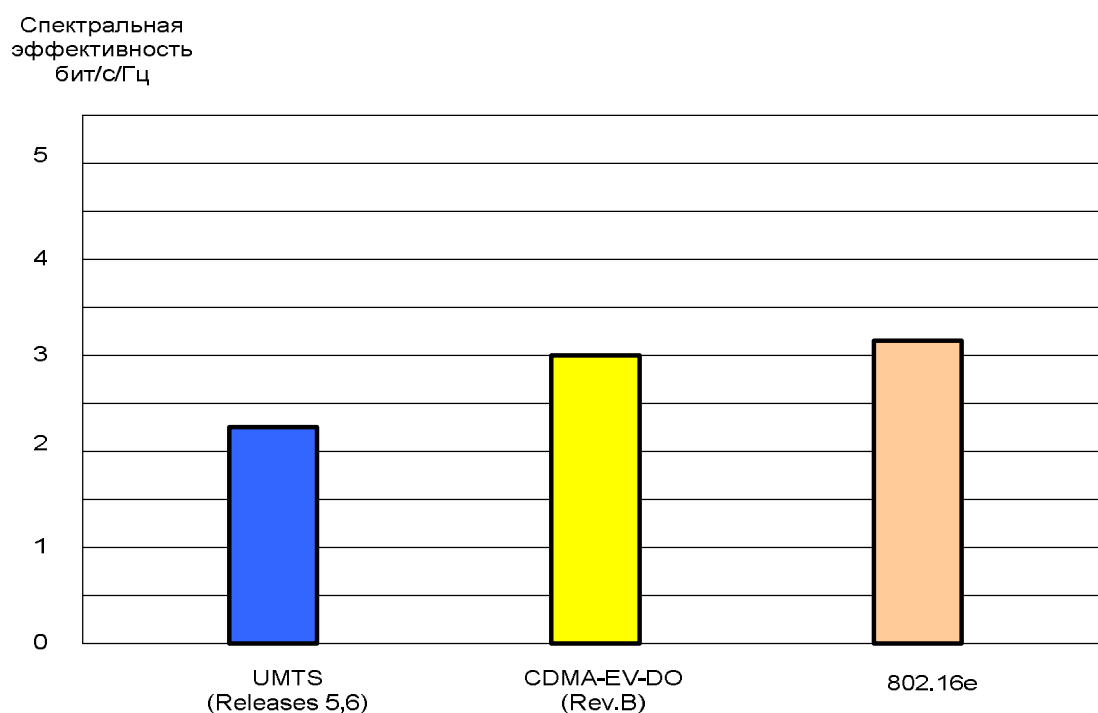


Рисунок 7.1 – Спектральная эффективность систем с шириной полосы канала 5 МГц

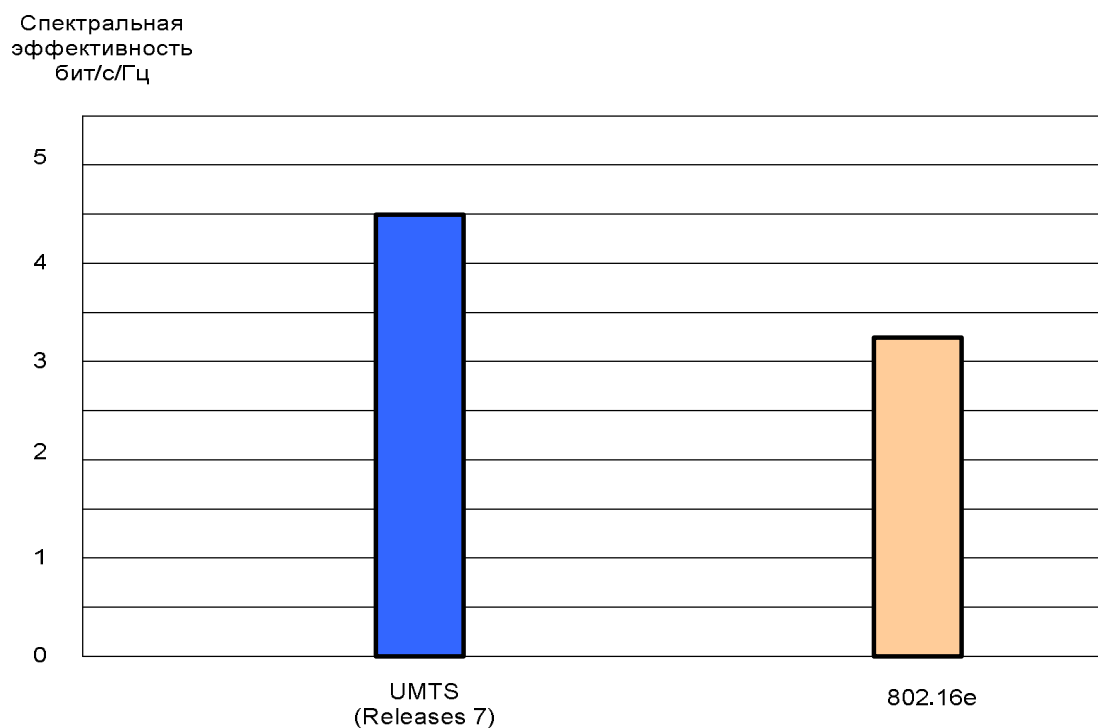


Рисунок 7.2 – Спектральная эффективность систем с шириной полосы канала 10 МГц

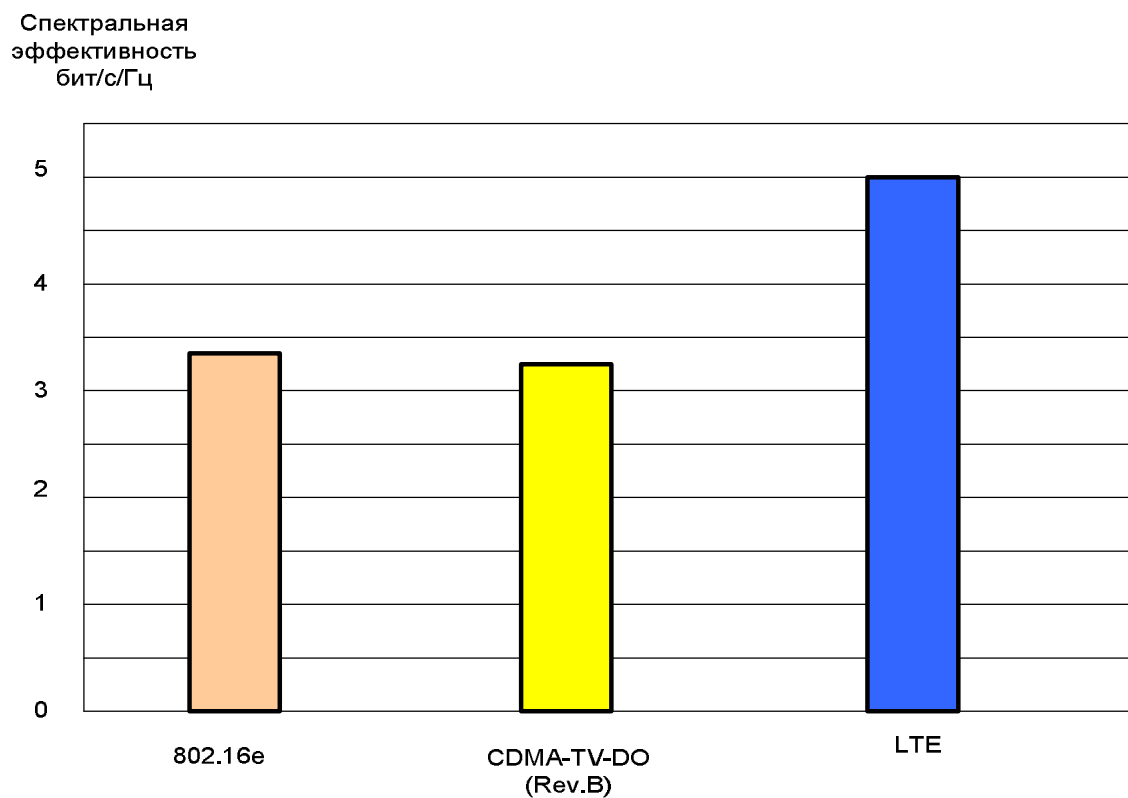


Рисунок 7.3 – Спектральная эффективность систем с шириной полосы канала 20 МГц

7.3 Контрольные вопросы

1. Дайте определение спектральной эффективности систем мобильной связи.
2. Какая спектральная эффективность достигается в LTE?

8 Библиография

- 1 Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е изд. М.: Издательский дом Вильямс, 2004.
- 2 Антонян А.Б. Подвижная сотовая связь в России на пороге третьего тысячелетия // Технологии и средства связи, 1997, № 5, с.44-48.
- 3 Андрианов В.Н., Соколов А.В., Средства мобильной связи. - СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 1999
- 4 Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 240 с.
- 5 В.М.Вишневский, А.И.Ляхов, С.Л.Портной, И.В.Шахнович. Широкополосные беспроводные сети передачи информации.-М.: Техносфера, 2005.- 592 с.
- 6 Возенкрафт Дж., Джекобс И. Теоретические основы техники связи. – М.: Мир, 1969.
- 7 Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
- 8 Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
- 9 Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. - М.: Эко-Трендз, 2005.- 384 с.
- 10 Громаков Ю.А. Стандарты и системы подвижной радиосвязи. – М.: Эко-Трендз, 1997, 238 с.
- 11 Ипатов В.П., Орлов В.К. Системы мобильной связи: Учебное пособие для Вузов.-М.: Горячая линия.-2003.-272 с.
- 12 Маглицкий Б.Н. Основы технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов : Учебное пособие / СибГУТИ.-2007 г.- 120 с.
- 13 Маглицкий Б.Н. Спектрально-эффективные методы модуляции в цифровых системах радиосвязи: Учебное пособие / СибГУТИ.- 2009 г.- 139 с.
- 14 Маглицкий Б. Н. Технология LTE систем сотовой связи четвертого поколения: Монография/СибГУТИ, Новосибирск, 2010.- 168 с.
- 15 Маглицкий Б.Н. Основы технологий множественного доступа в сетях сотовой связи: Учебное пособие/СибГУТИ.-2011 г.- 142 с.
- 16 Маглицкий Б.Н. Сигнально – кодовые конструкции для цифровых систем передачи: Монография/СибГУТИ.- 2006 г.- 104 с
- 17 Невдяев Л.М. CDMA: IS-95 // Сети, 2000, № 3
- 18 Невдяев Л.М. CDMA: архитектура радиоинтерфейса // Сети, 2000, № 1, с. 32-33
- 19 Невдяев Л.М. CDMA: канальная структура // Сети, 2000, № 2
- 20 Невдяев Л.М. CDMA: расширение спектра // Сети, 2000, № 5
- 21 Невдяев Л.М. CDMA: управление мощностью // Сети, 2000, № 4, с. 18-19
- 22 Невдяев Л.М. Стандарты 3G // Сети, 2000, № 6, с. 12-25
- 23 Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения/ Серия изданий «Связь и

- бизнес».- М.- 2000, 208 с.
- 24 *Попов В.И.* Основы сотовой связи стандарта GSM.- М.:Эко-трендз, 2005.- 296 с.
- 25 *Прокис Дж.* Цифровая связь/ Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
- 26 *Ратынский М.В.* Основы сотовой связи.- М.: Радио и связь, 1998.- 248с
- 27 *Р.Морелос-Сарагоса.* Искусство помехоустойчивого кодирования. Москва: Техносфера, 2005. – 320 с.
- 28 *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ./Под ред. В.В.Маркова.- М.: Связь, 1979 .- 592 с.
- 29 *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е издание. Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
- 30 *Тихвинский В.О., Терентьев С.В.* Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура.-М.-Эко-Трэндз, 2010.-284 с.
- 31 *Толмачев Ю.А.* Универсальные мобильные системы связи. Перспективы развития // Электросвязь, 1999, № 4, с. 4-5.
- 32 *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / Пер. с англ. под ред. В. И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.
- 33 *Финк Л.М.* Передача дискретных сообщений. – М.: Советское радио, 1970. – 315 с.
- 34 *Финк Л. М.* Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1963. — 576 с.
- 35 *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи. М., Техносфера, 2004.
- 36 *Шахнович И.В.* Современные технологии беспроводной связи: монография, Москва, Техносфера.- 2006. - 288 с.
- 37 Xiong Fuqin, Digital Modulation Techniques. Artech House Publishers, 2006.
- 38 Xiong Fuqin, Digital Modulation Techniques. Artech House Publishers, 2006.
- 39 <http://dspsystem.narod.ru/content/msk/msk.html>
- 40 PP TR 25.814 Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), Release 7, V7.1.0, 2006.

8 Терминология и основные определения

AMPS (Advanced Mobile Phone System) — усовершенствованная мобильная телефонная система. Стандарт сотовой связи, работающий в диапазоне 800 МГц. Относится к первому поколению сетей сотовой связи (аналоговая связь).

CDMA (Code Division Multiple Access) — множественный доступ с кодовым разделением. Способ использования радиочастот, при котором сигналы абонентских терминалов одновременно используют один частотный канал (в отличие от других технологий, где идет разделение по времени и/или частотам), при этом сигналы кодируются особым способом. Первоначально технология CDMA использовалась в военной связи США, однако сегодня она стала известна как глобальный цифровой стандарт для коммерческих систем коммуникаций.

CDMA One (IS-95A) — полностью цифровой стандарт, использующий диапазон частот 824-849 МГц для приема и 874-899 МГц для передачи. Коммерческие сети CDMA One появились в 1995 году и пользуются популярностью в Америке и в Азии.

CDMA2000 1X — следующий этап в развитии технологии CDMA после CDMA One. Сети CDMA2000 1X функционируют в той же полосе частот, что и сети CDMA One, но они обладают в 2 раза большей пропускной способностью голосовых каналов и скоростью передачи данных 144 Кбит/с. Реализованная фаза CDMA2000 1X не является полноценным 3G (сетью третьего поколения), так как не соответствует требованию скорости передачи данных до обязательных двух мегабит. Поэтому ее чаще называют 2.5G.

CDMA 2000 1x-EV — дальнейшее усовершенствование стандарта CDMA 2000 1X (сети 3G). С его помощью достигается наиболее эффективное использование частотного спектра, увеличивается пропускная способность передачи данных, достигается наивысшая скорость передачи информации от 2 до 5 Мбит/с все в той же полосе частот 1,25 МГц. Включает два этапа. В ходе первого этапа для более эффективного способа передачи информации потребуются достижение скорости передачи данных более 2,4 Мбит/с (CDMA2000 1X EV-DO). В ходе реализации второго этапа достигаются скорости передачи звука и данных в реальном масштабе времени (CDMA2000 1X EV-DV).

DAMPS (Digital Advanced Mobile Phone System) — стандарт сотовой связи второго поколения, цифровое развитие стандарта AMPS. Использует частоты в диапазонах 800 и 1900 МГц.

EDGE (Enhanced Datarate for GSM) — Расширенный диапазон передачи данных для развития стандарта GSM. Соединяет в себе набор новых и альтернативных схем модуляции, которые могут применяться внутри структуры временного отрезка радиоканала GSM, обеспечивая более высокую скорость передачи данных

или улучшенные спектральные характеристики. Фаза 1 технологии EDGE использует функции GPRS, обеспечивая скорость передачи данных до 384 кбит/с, фаза 2 предоставляет обслуживание в режиме реального времени, например передачу звука и мультимедиа (видео).

ETSI (European Telecommunications Standards Institute) — Европейский институт стандартизации электросвязи. Организация ETSI учреждена 14 января 1988 г. Основу ее деятельности составляет разработка телекоммуникационных стандартов.

FDMA (Frequency Division Multiple Access) — множественный доступ с разделением по частотам. Способ использования радиочастот, когда один радиоканал используется для связи только с одним абонентом. Разные абонентские терминалы используют для связи разные частоты в пределах соты. Этот принцип реализован в стандартах AMPS, NMT.

GPRS (General Packet Radio Service) — технология пакетной передачи данных в сотовых сетях, не только не требующая постоянного занятия канала, но предполагающая за счет одновременного использования нескольких тайм-слотов (временных интервалов) значительно более высокую скорость трафика данных — до 115 кбит/с, а в перспективе с помощью технологии модуляции Enhanced Data rate for GSM Evolution (EDGE) — до 384 кбит/с.

GSM (Global System for Mobile Communications) — глобальная система мобильной связи, цифровой стандарт мобильной связи. Стандарт сотовой связи, использующий частоты 900, 1800 и 1900 МГц. GSM использует TDMA технологию.

IMT-2000 (International Mobile Telecommunications — 2000) — международные мобильные средства телекоммуникаций 2000. Согласно данной инициативе IMT разрабатывает стандарт службы обеспечения радио доступа к глобальной телекоммуникационной инфраструктуре через спутниковые и наземные системы, которые призваны обслуживать пользователей фиксированных и мобильных систем в частных сетях и сетях общего пользования. Иными словами, это службы связи третьего поколения.

IMT-МС (IMT-2000 Multi Carrier) — представляет собой модификацию много-частотной системы CDMA2000, в которой обеспечивается обратная совместимость с оборудованием стандарта CDMAOne (IS-95). Увеличение пропускной способности реализуется за счет одновременной передачи сигналов на нескольких несущих с частотным дуплексным разносом, предполагается работа в непарных полосах частот.

IP-телефония — технология передачи информации в цифровом виде через каналы Интернет. Поскольку при IP-телефонном звонке не задействован международный (междугородний) телефонный оператор, стоимость этого звонка на порядок меньше стоимости традиционного телефонного соединения.

ITU (International Telecommunications Union) — международный союз по телекоммуникациям. Данная организация координирует использование правительственными и частными организациями глобальных телекоммуникационных сетей и интерфейсов.

NMT (Nordic Mobile Telephone) — аналоговые мобильные системы скандинавских стран. Стандарт был разработан в Скандинавских странах, работает в частотном диапазоне 450 МГц.

RAKE-приемник обрабатывает сигналы, прошедшие разными путями (лучами), выравнивая их по фазе и складывая по амплитуде, что позволяет использовать практически всю мощность принимаемого сигнала. Rake-приемники позволяют складывать мощности не только разных лучей от одной ячейки базовой станции (БС), но и от разных ячеек одной БС (сверхмягкий хэндовер), а также от разных БС (мягкий хэндовер — soft handover, SHO), что позволяет снизить мощность излучения БС и повысить емкость системы.

TDMA (Time Division Multiple Access) — множественный доступ с разделением по времени. Способ совместного использования радиочастот, когда один частотный канал разделяется на несколько временных промежутков (слотов), и в течение каждого промежутка канал используется для передачи сигнала от одного абонента. Таким образом, несколько абонентских терминалов могут использовать одну частоту в пределах одной соты. Временное разделение радиоканала TDMA используется в стандарте DAMPS и GSM.

TIA (Telecommunications Industry Association) — Комитет по стандартизации США.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) — универсальная система мобильной электросвязи, стандарт сотовой связи третьего поколения в Европе, разработанного ETSI.

WAP (Wireless Application Protocol) — бесплатный не лицензированный протокол беспроводной связи, позволяющий создавать расширенные системы мобильной телефонии и получать доступ к страницам Интернета с мобильных телефонов.

WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) — 1. Общее название технологии многостанционного доступа, основанной на использовании сигналов с расширенным спектром и высокой скоростью передачи данных. 2. Название проекта системы 3-го поколения, предложенного ARIB (Япония).

Абонентский терминал — аппарат, снабженный возможностями доступа к сети. Абонентам CDMA предлагаются терминалы с R-UIM картой и аппараты, привязанные к оператору. Первые удобны тем, что позволяют быстро менять трубки. У вторых преимущество заключается в том, что в случае потери или кражи телефона, переподключить «злоумышленникам» этот теле-

фон будет практически невозможно, поскольку система сразу укажет, что такой телефон уже зарегистрирован и был утерян, украден и т.д. Таким образом, появляется неплохой шанс вернуть утерянный терминал.

Базовая станция — комплекс оборудования, установленный обычно на высоком здании или специальной вышке и обеспечивающий связь мобильного телефона с коммутатором (АТС оператора). Базовые станции управляются контроллером базовых станций.

Поколения связи:

1G — первое поколение сетей сотовой связи. К нему относятся сети аналоговой связи (стандарты AMPS/N-AMPS, NMT-450). Эти стандарты являются устаревшими. Скорость передачи данных от 9,6 Кбит/с до 14,4 Кбит/с.

2G — цифровая связь. Сети 2G имеют сегодня наибольшую абонентскую базу в мире. Помимо собственно голосового общения они предусматривают передачу данных со скоростью такой же, как в 1G.

2.5G — технологии переходного периода, основанные на использовании усовершенствованных средств 2-го поколения, но способные обеспечивать услуги 3-го поколения. Скорость передачи данных от 57,6 Кбит/с до 115 Кбит/с.

3G — новое поколение систем мобильной связи, разрабатываемое в рамках программы IMT-2000. Сети радиодоступа этого поколения будут обеспечивать обмен информацией со скоростью до 144 кбит/с для абонентов с высокой мобильностью (скорость движения до 120 км/ч), 384 кбит/с для абонентов с низкой мобильностью (скорость до 3 км/ч) и 2,048 Мбит/с.

Сота — зона охвата одной базовой станции.

Хэндовер (soft handoff) — автоматическая передача управления мобильной станцией. Функция осуществляется при перемещении мобильной станции абонента из зоны действия одной БС в зону действия другой, чтобы не прерывать установленное соединение.

Системы мобильной связи 4-го поколения (4G) - новое поколения беспроводных широкополосных сетей, которое в очень недалеком будущем заменит поколение систем **мобильной связи 3-го поколения (3G)**. В соответствии с рекомендациями Международного союза электросвязи (ITU) мобильные системы 4G должна включать IP пакетную **транспортную платформу** (бекбон) и обеспечивать скорость передачи для мобильных абонентов до **100 Мбит/с**, для фиксированных – до **1 Гбит/с**. Основные технические требования к системам **мобильной связи 4-го поколения (4G)** сформулированы в рамках проекта Международного союза электросвязи (ITU) **IMT-Advanced**. Мировое развитие мобильных технологий 4G осуществляется по следующим направлениям:

- проект **LTE/SAE/EPS**, предложенный **Форумом 3GPP**;
- проект **UMB**, предложенный **Форумом 3GPP2**;
- проект **Mobile WiMAX**, предложенный **WiMAX Форумом**;
- ряд исследовательских проектов **4G** азиатских производителей и телекоммуникационных операторов.

Проект Долгосрочной Эволюции (Long Term Evolution - LTE) - предложенный **3GPP Форумом** проект по модернизации исключительно радиointерфейса (т.н. **3GPP Release 8**) для семейства **мобильных технологий 3-го поколения (3G)** с использованием новой **радиотехнологии ортогонального многочастотного адаптивного мультиплексирования (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access - OFDMA)** на канале "вниз", и **метод частотного разделения с одной несущей (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access - SC-FDMA)** на канале "вверх". Основные работы по стандартизации проекта **4G LTE** осуществляются в рамках **3GPP Release 8**.

Проект Эволюции системной архитектуры (System Architecture Evolution - SAE), переименованный в EPS (Evolution Packet System Architecture) - предложенный **3GPP Форумом** проект по модернизации сетевой и транспортной платформы на базе IP. Основными компонентами архитектуры SAE/ESP являются: Ядро улучшенной пакетной передачи (**Evolved Packet Core - EPC**), Подсистема управления мобильностью (**Mobility Management Entity - MME**), обслуживающий шлюз (**Serving Gateway - SW**) и Шлюз пакетной передачи (**PDN Gateway P-GW**). Стандартизация проекта SAE/ESP проводится в рамках Релиза **Release 9**.

Общий проект мобильной системы 4-го поколения (**4G**), разрабатываемый **3GPP Форумом**, включает в себя оба проекта: **LTE** и **SAE/ESP**.

Пост-3G (Beyond 3G - B3G) - обобщенное название **исследовательских проектов** в рамках разработки мобильных систем, следующих за системами **3-го поколения (3G)**, выполняемых Еврокомиссией в 2002 -2006 г. в рамках программы **IST (Information Society Technologies)**. Технологии **Beyond 3G (B3G)** должны обеспечивать эффективные и защищенные IP решения для голоса и данных, поддерживать сервисную концепцию "в любое время в любом месте", обеспечивать намного большие **пропускные способности**, нежели системы 3G. После 2007 года термин "**Beyond 3G**" постепенно выходит из употребления и заменяется понятием "**4-th Generation (4G)**".

Super 3G (Evolved UMTS, 3.99G) - неофициальные названия разработанного **3GPP Форумом** стандарта на усовершенствованный радиointерфейс для проекта **LTE** по общим названием: **Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRA)**. E-UTRA является дальнейшим развитием семейства **радиотехнологий**

для сети радиодоступа 3G (UMTS Terrestrial Radio Access -**UTRA**) и стандартизируется в рамках 3GPP Release 8 и серии стандартов TS 36.x. E-UTRA использует радиотехнологии OFDMA и SC-FDMA, тем самым она несовместима с базовой радиотехнологией 3G - WCDMA. После того, как в середине 2008 года 3GPP Форум с целью согласования технических требований проектов LTE и IMT-Advanced приступил к разработке проекта LTE-Advanced, дополнительные требования к радиоинтерфейсу E-UTRA были сформулированы в стандарте **TR 36.913**.

Ортогональное частотное мультиплексирование (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM), связанные с ним названия **Coded OFDM (COFDM)** и **Discrete Multi-Tone Modulation (DMT)** - схема мультиплексирования с частотным разделением (Frequency-Division Multiplexing - FDM), используемая в качестве метода цифровой модуляции множественных несущих. В процессе передачи OFDM полная **полоса частот** разбивается на отдельные подполосы, в каждой из которых несущие модулируются низкочастотными сигналами и потом объединяются для формирования сложного сигнала.

Множественный доступ с ортогональным частотным разнесением (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)) - многопользовательская версия схемы цифровой модуляции OFDM, в которой множественный доступ осуществляется назначением поднаборов субнесущих отдельным пользователям, что позволяет достичь следующих преимуществ:

- OFDMA=OFDM+**FDMA**+**TDMA/TDD**;
- более эффективная борьба с многолучевыми замираниями;
- возможности существенного повышения показателя спектральной эффективности за счет применения схемы множественных антенн (MIMO);
- отсутствие необходимости в реализации покрытия по типу "дышащих сот" при значительной загрузке.

Множественный доступ с частотным разделением одной несущей (Single-carrier FDMA (SC-FDMA)) - многопользовательская версия схемы модуляции (Single Carrier Frequency-Domain-Equalization (SC-FDE)), рассматриваемая как схема линейного предкодирования OFDMA. Главное достоинство SC-FDMA - низкий пик-фактор.

Интеллектуальные антенны (смарт-антенны) - подкласс антенных решеток, использующий алгоритмы программной обработки сигналов для определения направления прибытия сигнала и для вычисления векторов Диаграммы направленности для отслеживания и определения расположения луча антенны в нужном направлении. В интеллектуальных антеннах (смарт-антеннах) используются следующие методы сигнальной обработки:

- **формирование Диаграммы направленности (Beamforming)**, также известное как **Коммутация лучей** - для концентрации энергии сигнала в главном направлении;

- **оценка направления прихода сигнала** (Direction of arrival estimation – (DoA), также известное как разнесение) - для захвата сигнального луча с наибольшей амплитудой в любой момент.

Метод множественных антенн (Multiple Input - Multiple Output - MIMO) - технология передачи данных, в которой на передающей стороне поток данных разделяется на N потоков для обработки и передачи по отдельным передающим трактам (многолучевым радиоканалам), а на приемной стороне осуществляется мультиплексирование множественных каналов и одновременная обработка искажений и ошибок. Методы MIMO разделяются на следующие классы:

- **методы MIMO класса 1** - предназначены для улучшения отношения сигнал/шум путем максимизации пространственного разнесения. К ним относятся: а) разнесение по задержке; б) пространственно-временные блочные коды (Space-Time Block Code - STBC); в) пространственно-временные решетчатые (треллис) коды (Space-Time Trellis Code - STTC);

- **методы MIMO класса 2** - используют т.н. уровневый подход для увеличения пропускной способности. Один из наиболее эффективных методов - V-BLAST (Vertical-Bell Labs Layered Space-Time Architecture), базирующийся на пространственном мультиплексировании;

- **методы MIMO класса 3** - основываются на использовании знания статистических данных канала для пред- и пост-обработки на передающей и приемной стороне для достижения предельной пропускной способности.

IP-OFDMA (TDD WMAN) - одна из базовых радиотехнологий проекта мобильных сетей будущих поколений (IMT-Advanced), утвержденная на Ассамблее Всемирной радиоконференции 18 октября 2007 года. За техническую основу IP-OFDMA взята радиотехнология Mobile WiMAX (IEEE 802.16e).

Борис Николаевич Маглицкий

МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СОТОВЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Учебное пособие

Редактор: Г.А. Воинцев
Корректор: И.Л. Гончарова

Подписано в печать 09.09.2013
формат бумаги 60x84/16, отпечатано на ризографе, шрифт № 10,
изд.л.11,2; заказ № 68, тираж 150, СибГУТИ
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86