

Лекция №4: Системы подвижной связи

План лекции:

- I Свойства мобильных устройств.
 - II История радиотелефонных систем.
 - III Первое поколение сотовой связи 1G.
 - IV Второе поколение сотовой связи 2G.
 - V GPRS и EDGE (2.5G и 2.75G)
 - VI Сети 3G IMT-2000 (UMTS).
 - VII Pre-4G стандарт LTE
 - VIII 4G LTE-Advanced (3GPP Release 10)
-

I СВОЙСТВА МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Мобильным считается устройство, отвечающее следующим критериям:

- является компактным (человек может носить его с собой);
- работает с использованием каналов радиосвязи;
- позволяет одному абоненту вызвать другого с использованием уникального номера;
- определенным образом интегрировано с проводными телефонными сетями;
- общедоступно (возможность подключения не требует получения разрешения от тех или иных компетентных органов и ограничивается финансовыми и инфраструктурными ресурсами абонентов).

Рис. 4.1 иллюстрирует основные этапы в развитии мобильных устройств: уменьшение размеров самого телефона и его антенны, повышение удобства клавиатуры, увеличение экрана, замена клавиатуры на сенсорный экран, расширение функционала (умные устройства – смартфоны) и как следствие – увеличение габаритов, памяти, повышение качества услуг.



Рис. 4.1. Эволюция мобильных устройств

II ИСТОРИЯ РАДИОТЕЛЕФОННЫХ СИСТЕМ

2.1 США

В 1933 г. между автомобилями нью-Йоркской полиции могла осуществляться связь с использованием полудуплексных радиопередатчиков.

В 1946 г. В штате Миссури была развёрнута мобильная сеть, в которой частные абоненты могли осуществлять связь друг с другом с использованием радиооборудования при посредничестве оператора.

В 1948 г. в штате Индиана была запущена инфраструктура, позволяющая одному абоненту вызывать другого в автоматическом режиме.

Системы имели существенные ограничения по количеству частот и каналов, что не позволяло подключать к мобильным сетям достаточно большое количество абонентов одновременно.

Автомобильные телефоны

В 1946 году появился первый автомобильный телефон, разработанный компанией Bell System.

Первая версия весила 36 кг. Тестовая эксплуатация была начата в Сент-Луисе, телефон был изначально был трёхканальным. Возможность воспользоваться «автотелефоном» существовала до начала 80-х.

В Чикаго радиотелефонный сервис предоставляла Motorola (рис. 4.2). Однако из-за малой «номерной ёмкости» частот, предельное количество абонентов быстро достигло максимума.

Со временем, существующих абонентов автомобильных радиотелефонов в

США перевели на CDMA, GSM и даже на спутниковую связь Iridium.



Рис. 4.2. Автомобильный телефон Motorola

В США сервис автотелефонной связи не предоставляется с 2008 года.

2.2 СССР – Россия

Во время Великой Отечественной войны идею о создании особого устройства монофона предложил советский учёный Георгий Ильич Бабат. Данный аппарат должен был представлять собой переносной телефон, функционирующий в автоматическом режиме. Предполагалось, что он будет работать в диапазоне 1-2 ГГц. Принципиальной особенностью аппарата являлось обеспечение передачи голоса посредством разветвлённой сети специальных волноводов.

В 1946 году Г. Шапиро и И. Захарченко предложили систему автомобильной радиотелефонной связи. Основой инфраструктуры мобильной связи должны были быть действующие городские станции, дополненные специальным радиооборудованием. В качестве идентификатора абонента предполагалось использовать специальные позывные.

В апреле 1957 года советский инженер Леонид Иванович Куприянович создал опытный образец коммуникационного устройства – радиотелефона ЛК-1. Данный прибор обладал радиусом действия порядка 30 км и имел значительный вес – порядка 3 кг. Он мог обеспечивать связь за счёт взаимодействия со специальной АТС, которая могла подключаться к городским телефонным линиям и давал возможность осуществлять вызовы и принимать их.

Впоследствии телефон был усовершенствован – значительно уменьшен вес и габариты устройства. В обновлённой версии вес радиотелефона составлял порядка 500 граммов вместе с аккумулятором. Автор рассчитывал, что

советский мобильный телефон найдёт широкое применение в народном хозяйстве, в быту и станет предметом личного пользования граждан.

В 1959 году болгарский учёный Христо Бачваров разработал мобильное устройство, схожее по основным принципам с телефоном Л.И. Куприяновича, и запатентовал его.

Система «Алтай» 1963 г. – начало 2010 гг.

Данная система, во-первых, позволяла одним абонентам вызывать других по номерам; во-вторых, была интегрирована с городскими сетями. Но общедоступной она не была: списки абонентов утверждались на ведомственном уровне для чиновников (рис. 4.3а, б).



а



б

Рис. 4.3. Автомобильная телефонная система «Алтай»: а – 1970 гг.; б – 1980 гг.

Система «Алтай» была запущена в 60-х годах в Москве, а в 70-х была развёрнута ещё более чем в 100 городах СССР. Она активно использовалась в период проведения Олимпиады 1980 года. К 2000 гг. система охватывала 200 городов бывшего СССР.

2.3 Европа и Япония

В Западной Европе первые системы телефонной связи с использованием радиооборудования были испытаны в 1951 году.

В 60-х годах работы в данном направлении активно велись в Японии. Именно японские разработчики установили, что оптимальная частота для инфраструктуры мобильной связи – 400 и 900 МГц (частоты, применяемые в стандартах NMT и GSM).

Одной из передовых стран в части внедрения разработок в области организации функционирования полноценной инфраструктуры сотовых сетей стала Финляндия. В 1971 г. финны начали развёртывать коммерческую сотовую сеть, территория покрытия которой к 1978 г. охватила всю страну.

Основной упор финны делали на автомобильные устройства. Самые известные их сети: Autoradiopuhelin или Car Radiophone.

2.4 Лаборатория Белла (Bell Laboratories)

В 1947 г. сотрудник компании Д. Ринг предложил концепт деления территории на небольшие участки – соты или ячейки (англ. *cells*) радиусом 1-5 км. и отделения связи внутри ячейки от связи между ячейками. Это позволило бы использовать в разных отдалённых друг от друга сотах одни и те же частоты.

В центре каждой ячейки предлагалось расположить базовую приёмно-передающую радиостанцию, которая обеспечивала радиосвязь в пределах ячейки со всеми абонентами. Размеры соты определялись максимальной дальностью связи радиотелефонного аппарата с базовой станцией. Эта максимальная дальность получила название радиуса соты.

У каждого абонента должна быть своя микрорадиостанция – «мобильный телефон» – комбинация телефона, приёмопередатчика и мини-компьютера.

Для обеспечения бесперебойной связи при переходе абонента от одной зоны к другой потребовалось применение компьютерного контроля за телефонным сигналом, излучаемым абонентом, но компьютерная техника 40-х гг. не соответствовала требованиям сотовой связи.

Практическое применение сотовой связи стало возможным только после изобретения микропроцессоров и интегральных полупроводниковых микросхем.

Реализация концепции Д. Ринга на практике была осуществлена в 1969 году.

Главными соперниками здесь стали корпорации AT&T и Motorola. При этом, первая компания делала акцент на развёртывании автомобильных систем связи, как и телекоммуникационные корпорации Финляндии, вторая – на внедрении компактных девайсов, которые любой желающий абонент мог носить с собой. Как теперь известно, победила вторая концепция.

2.5 Первый сотовый телефон 1973 г.

Первый сотовый телефонный аппарат прототип современного аппарата сконструировал Мартин Купер (фирма Motorola, США).

В 1973 году в Нью-Йорке, на вершине 50-этажного здания компанией Motorola, под его руководством была смонтирована первая в мире базовая станция сотовой связи. Она могла обслуживать не более 30 абонентов и соединять их с наземными линиями связи.

3 апреля 1973 года Мартин Купер набрал номер своего начальника и произнёс следующие слова: «Представь себе, Джоэл, что я звоню тебе с первого в мире сотового телефона. Он у меня в руках, а я иду по Нью-Йоркской улице».

Телефон назывался DynaTac. Его размеры были 225x125x375 мм, а вес составлял 1,15 кг, что, впрочем, намного меньше 30-килограммовых устройств радиосвязи конца 40-х гг. (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Конструктор первого сотового телефона Мартин Купер, прототип первого девайса и первый коммерческий телефон Motorola DynaTAC 8000X, выпущенный в 1983 г.

Прототип был снабжён цифровыми клавишами для набора номера, а также двумя специальными кнопками для отправки вызова, а также прекращения разговора. Девайс имел аккумулятор, благодаря которому мог функционировать в режиме ожидания вызова порядка 8 часов, а в режиме разговора – примерно 1 час. Заряжать аккумулятор первого сотового телефона нужно было более 10 часов.

Если же говорить о первой коммерческой версии Motorola DynaTAC 8000X, весил данный аппарат порядка 800 граммов, его размеры были сопоставимы с прототипом, а память была рассчитана на 30 абонентских номеров.

2.6 Первенство в изобретении, реализации и коммерциализации мобильной связи

Компания Motorola первая предложила мобильный телефон в современном понимании – функционирующий по принципу распределения базовых станций по сотам, а также имеющий компактный формат.

Таким образом, если говорить о том, в какой стране именно был изобретён первый в мире мобильный телефон, как переносной, компактный аппарат, являющийся частью инфраструктуры сотовой связи, то правомерно будет определить, что данным государством стали США.

Вместе с тем стоит отметить, что советская система «Алтай» функционировала вполне успешно с 1963 г. до 2011 г. без внедрения технологий американского образца. Таким образом, инженеры из СССР принципиально доказали возможность развёртывания инфраструктуры мобильной связи в национальном масштабе без использования принципов распределения базовых станций по сотам.

Коммерческая сеть автомобильной связи была развёрнута в Финляндии, начиная с 1971 г. – здесь первенство за ними.

III ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ СОТОВОЙ СВЯЗИ 1G

NMT-450 (англ. *Nordic Mobile Telephone*) – результат совместных исследований учёных Швеции, Финляндии, Исландии, Дании и Норвегии в конце 1970-х гг.

В 1986 г. был добавлен стандарт NMT-900 в новом диапазоне частот.

AMPS (англ. *Advanced Mobile Phone Service*) был разработан фирмой Bell Laboratories в 1983 г. в США.

В 1985 г. в Англии, был принят стандарт TACS (англ. *Total Access Communications System*), являвшийся разновидностью американского AMPS.

В 1987 г. из-за резко возросшего числа абонентов, был принят стандарт HTACS (Enhanced TACS), добавивший новые частоты и частично исправивший недостатки предшественника.

Франция реализовала собственный стандарт Radiocom-2000 в 1985 г.

Все стандарты 1G основаны на аналоговых методах модуляции ЧМ и ФМ и частотном разделении каналов FDMA.

Недостатки 1G:

- 1) Возможность прослушивания разговоров.
- 2) Сложность борьбы с замираниями, возникающими из-за движения абонентов, ландшафта местности и застройки.
- 3) Нехватка и перегруженность частотных каналов.

NMT-450

Рабочие частоты:

UpLink:	453-457,5 МГц;
DownLink:	463-467,5 МГц;
Дуплексный разнос каналов	10 МГц.

Изначально в NMT использовалась сетка каналов с шагом 25 кГц, но с увеличением количества абонентов шаг сетки уменьшили до 12,5 КГц, вставив между обычными каналами дополнительные, увеличив тем самым ёмкость сети.

Число каналов:	180 (360);
Зона покрытия БС:	15-40 вплоть до 70 км;
Мощность передатчика БС:	до 50 Вт;
Мощность передатчика МС:	15; 1.5; 0.15 Вт

NMT-900

Рабочие частоты:

UpLink:	890-915 МГц;
DownLink:	935-960 МГц.
Дуплексный разнос каналов	25 МГц.
Число каналов:	999;
Зона покрытия БС:	2-20 вплоть до 35 км;
Мощность передатчика БС:	до 25 Вт;
Мощность передатчика МС:	6; 1; 0.1 Вт

Сервисы NMT:

Определение номера, голосовая почта, факс-почта, конференцсвязь, переадресация вызова, SMS, синхронизация часов.

Скорость передачи:	4.8 кбит/с.
--------------------	-------------

NMT-450 в России

Одним из первых мобильных телефонов стандарта NMT-450 стал аппарат **Nokia Mobira Cityman 450 NMT Brick Phone** (рис. 6.5а), знаменитый тем, что именно с этого телефона 9 апреля 1987, находясь в отеле «KALASTAJATORPPA» (Хельсинки, Финляндия), генеральный секретарь ЦК КПСС М.С. Горбачёв (рис. 6.5б) совершил мобильный звонок в Министерство связи СССР, за что телефон получил шутливое название «Горба», причём при разговоре присутствовал тогдашний вице-президент Nokia Стефан Видомски.

Для пользования первыми мобильниками в России требовалось специальное разрешение, которое необходимо было всегда иметь при себе и предъявлять по требованию милиции (рис. 4.6).

Отмена этих документов произошла примерно в 2000 г.



а



б

Рис. 4.5. Nokia Mobira Cityman 450 NMT Brick Phone: а – мобильный телефон; б – звонок Михаила Горбачёва

Действительно до
* 24 август 2003г.

ГОССВЯЗНАДЗОР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РАЗРЕШЕНИЕ 77 № 1289824

НА ПРАВО ПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОТЕЛЕФОНОМ

ТОО "Московская Сотовая Связь"

Думнов Алексей Владимирович (инициалы владельца)

Управление Госсвязнадзора в РСО (инициалы владельца организации)

Тип и серия аппарата (заводской) Nokia 8440

Тип и гос. номер автомашины 9140883052

Номер телефона (ствол / ИВ) 470-28-00

Разрешенная мощность (Вт) 1

Начальник Управления Госсвязнадзора в РСО и Московской области

М.П. (подпись)

Рис. 4.6. Разрешение на право пользования радиотелефоном

IV ВТОРОЕ ПОКОЛЕНИЕ СОТОВОЙ СВЯЗИ 2G

В 1982 году Европейская Конференция Административных Почт и Электросвязи (CEPT), объединяющая 26 стран, приняла решение о создании специальной группы *Groupe Special Mobile*. Её целью была разработка единого европейского стандарта цифровой сотовой связи.

В 1990 г. были предложены спецификации стандарта, который получил название GSM (англ. *Global System for Mobile*).

Первоначально для реализации нового стандарта был выделен диапазон частот 900 МГц, а затем ещё и 1800 МГц.

Другое название стандарта GSM-1800 – DCS-1800 (англ. *Digital Cellular System 1800*).

GSM-900 (GSM-1800) является **цифровым** стандартом сотовой связи. В нём реализовано временное разделение каналов TDMA – **множественный доступ с разделением по времени** (англ. *Time Division Multiple Access*), шифрование сообщений, блочное кодирование, а также модуляция GMSK (англ. *Gaussian Minimum Shift Keying*).

Расширен набор услуг по сравнению с 1G:

- услуги передачи данных (синхронный и асинхронный обмен данными;
- передача речевой информации;
- передача коротких сообщений (SMS);
- передача факсимильных сообщений;
- определение вызывающего номера и ограничение такого определения;
- безусловная и условная переадресация вызова на другой номер;
- ожидание и удержание вызова;
- конференцсвязь (одновременная речевая связь между тремя и более подвижными станциями);
- запрет на определённые пользователем услуги (международные звонки, роуминговые звонки и др.);
- голосовая почта и др.

По сравнению с NMT и AMPS в GSM была увеличена ёмкость базовых станций, снижены мощности излучателей, что повлекло также снижение веса телефонов.

Были улучшены безопасность и помехозащищённость, а также выросло общее качество связи.

GSM-900

Рабочие частоты:

UpLink:	890-915 МГц;
DownLink:	935-960 МГц;
Ширина полосы	200 кГц;

Дуплексный разнос каналов	45 МГц;
Число частотных каналов:	124;
Зона покрытия БС:	до 35 км;
Мощность передатчика БС:	5-20 Вт;
Мощность передатчика МС:	2 Вт
Скорость передачи в радиоканале:	9.6 кбит/с.

GSM-1800

Рабочие частоты:

UpLink:	1710–1785 МГц;
DownLink:	1805–1880 МГц;
Ширина полосы	200 кГц;
Дуплексный разнос каналов	95 МГц;
Число частотных каналов:	374;
Зона покрытия БС:	до 17 км;
Мощность передатчика БС:	10-30 Вт;
Мощность передатчика МС:	1 Вт

К уже имеющимся добавлены частные диапазоны: 800 МГц и 1900 МГц.

Архитектура GSM-800/900/1800/1900

Обобщённая архитектура сетей GSM представлена на рис. 4.7.

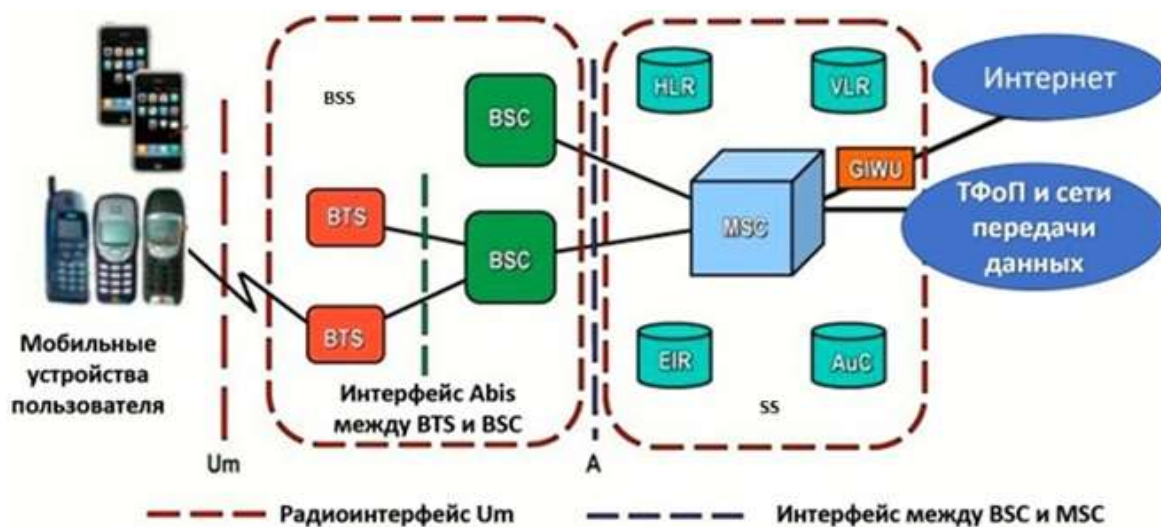


Рис. 4.7. Архитектура сетей GSM

Классическая структура сети GSM состоит из 2 систем, каждая из которых содержит функциональные устройства, являющиеся компонентами сети мобильной радиосвязи:

- **коммутационная система SS** (англ. *Switching System*) осуществляет обслуживание вызовов;

– *система базовых станций BSS* (англ. *Base Station System*) выполняет функции, относящиеся к радиоинтерфейсу.

Состав коммутационной системы:

- *центр аутентификации* (проверки подлинности абонента) AUC (англ. *Authentication Center*);
- *база данных абонентского оборудования EIR* (англ. *Equipment Identity Register*);
- *база данных «домашних» абонентов HLR* (англ. *Home Location Register*);
- *центр мобильной коммутации MSC* (англ. *Mobile Switching Center*);
- *база данных «гостевых» абонентов*, находящихся в зоне данного MSC VLR (англ. *Visitor Location Register*).

Состав системы базовых станций:

- *контроллер базовых станций BSC* (англ. *Base Station Controller*);
- *приёмопередающая Базовая Станция BTS* (англ. *Base Transceiver Station*).

Контроль за обеими системами осуществляется из *центра управления NMC* (англ. *Network Management Center*). *Центр технического обслуживания OMC* (англ. *Operation and Maintenance Center*) осуществляет эксплуатационно-техническое обслуживание сети, например, проводит отслеживание сетевого трафика и аварийных сигналов от всех сетевых элементов. OMC имеет доступ как к системе SS, так и к системе BSS.

На обратной от базовой станции (БС) стороне радиоинтерфейса (Um) находятся *мобильные станции MS* (англ. *Mobile Station*) или *абонентские устройства UE* (англ. *User Equipment*). MS не относится ни к одной из описанных выше систем, но является элементом сети.

TDMA

В GSM каждый частотный канал делится на 8 временных слотов (рис.4.8).

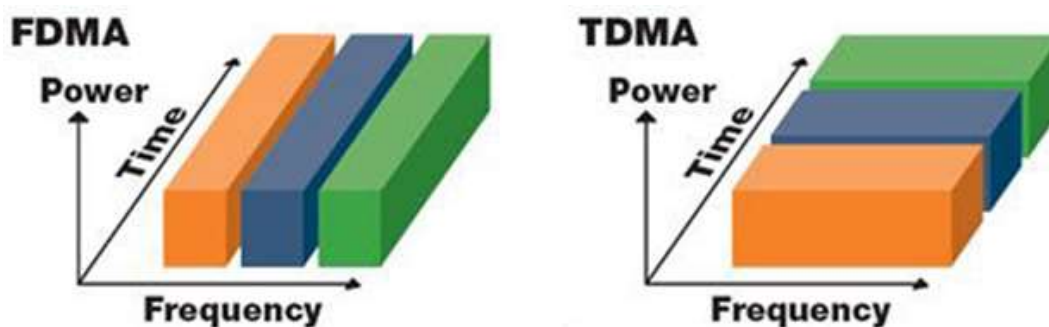


Рис. 4.8. Частотное и временное разделение каналов

Множественный доступ с разделением по времени TDMA (англ. *Time Division Multiple Access*) – способ использования радиочастот, когда в одном

частотном интервале находятся несколько абонентов, разные абоненты используют разные временные слоты (интервалы) для передачи. TDMA является приложением мультиплексирования канала с разделением по времени TDM (англ. *Time Division Multiplexing*) к радиосвязи. Таким образом, TDMA предоставляет каждому пользователю полный доступ к интервалу частоты в течение короткого периода времени (рис. 4.9).

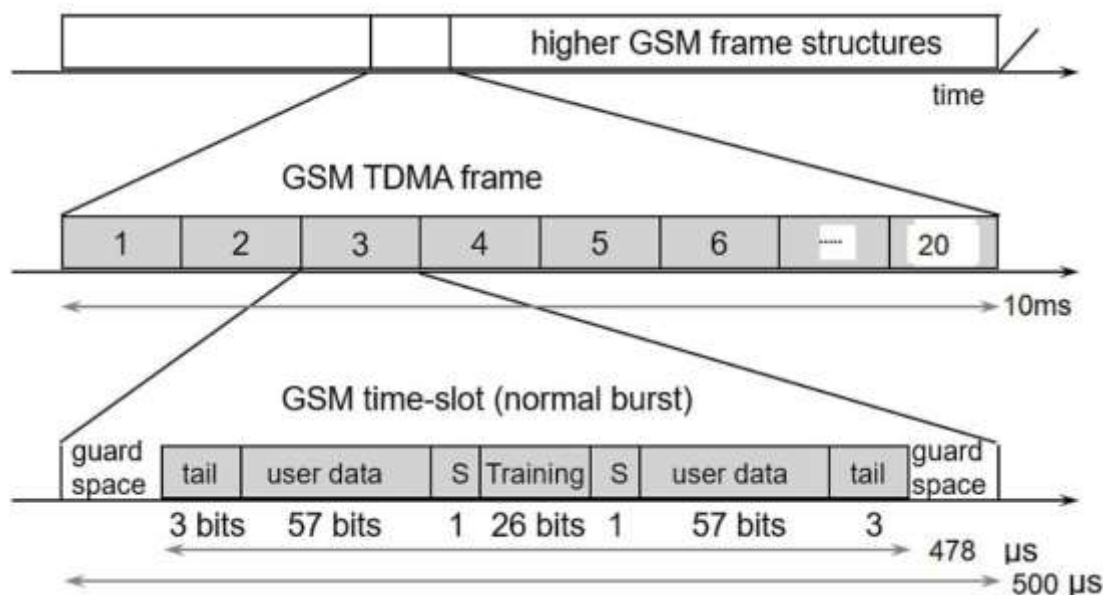


Рис. 4.9. Тайм-слоты GSM

V GPRS и EDGE (2.5G и 2.75G)

5.1 GPRS

Пакетная радиосвязь общего пользования GPRS (англ. *General Packet Radio Service*) – это способ передачи данных по сетям сотовой связи, который позволяет достигать скорости до 171,2 кбит/с.

Основными задачами технологии GPRS являются: эффективное использование канального ресурса, создание комфортной среды для абонента при работе с Интернетом, при передаче и получении мультимедийных сообщений MMS (англ. *Multimedia Messages Service*).

Физические каналы GPRS:

Физические каналы в GPRS определяются 3-мя параметрами:

- частота;
- временной интервал (TS);
- радиоблок.

По назначению каналы разделяют на **каналы трафика** PDTCH (англ. *Packet Data Traffic Channel*) и **управления**.

Для передачи логических каналов в GSM/GPRS сетях организован 52-кадровый мультикадр (в отличие от 26- и 51-кадровых мультикадров классической системы GSM).

Структура мультикадра GPRS:

Структура кадров GPRS представлена на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Мультикадр GPRS

Мультикадр состоит из 12 блоков (B0–B11) по 4 кадра каждый и 4-х кадров вне блоков. Каждый блок используют для передачи сообщения одного из логических каналов трафика или управления (за исключением сообщений каналов PTCH).

Кадровая структура GSM при этом полностью сохранена.

Ядро системы GPRS

Ядро системы GPRS (англ. *GPRS Core Network*) состоит из двух основных блоков (рис. 4.11):

- **узел поддержки GPRS** SGSN (англ. *Serving GPRS Support Node*)
- **шлюзовой узел GPRS** GGSN (англ. *Gateway GPRS Support Node*).

SGSN можно условно назвать аналогом MSC – коммутатора сети GSM.

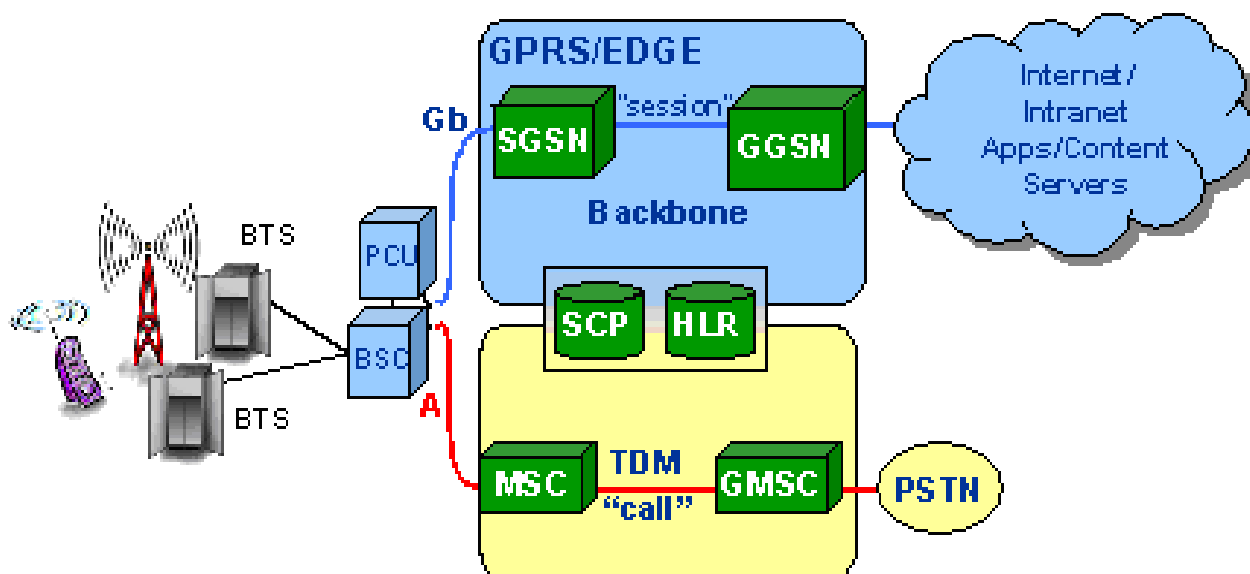


Рис. 4.11. Архитектура GPRS поверх GSM

SGSN контролирует доставку пакетов данных пользователям,

взаимодействует с домашним реестром абонентов сети HLR, проверяя, разрешены ли запрашиваемые пользователями услуги, проводит мониторинг находящихся в сети пользователей, организует регистрацию абонентов, вновь "проявившихся" в зоне действия сети и т.п.

GGSN – это шлюз между сотовой сетью (её частью для передачи данных GPRS) и внешними информационными магистралями (Internet, корпоративными интранет-сетями, другими GPRS системами и т.д.). Основной задачей GGSN, является **маршрутизация данных**, идущих от/к абоненту через SGSN. Вторичными функциями GGSN являются **адресация данных**, **динамическая выдача IP-адресов**, а также **отслеживание информации о внешних сетях и собственных абонентах** (в том числе тарификация услуг).

В GPRS-систему заложена хорошая масштабируемость, т.е. при появлении новых абонентов оператор может увеличивать число SGSN, а при эскалации суммарного трафика – добавлять в систему новые GGSN.

Внутри ядра GPRS-системы (между SGSN и GGSN) данные передаются с помощью специального **туннельного протокола GTP** (англ. *GPRS Tunneling Protocol*).

Ещё одной составной частью системы GPRS является **устройство контроля пакетной передачи PCU** (англ. *Packet Control Unit*).

PCU стыкуется с контроллером базовых станций BSC и отвечает за направление трафика данных непосредственно от BSC к SGSN.

Свойства GPRS:

- GPRS поддерживает протоколы пакетной передачи данных, а именно, IP (Internet Protocol) и X.25.
- физический канальный ресурс выделяют группе пользователей; занятие канала производят по мере поступления пакетов в соответствии с качеством услуг QoS (англ. *Quality of Service*), предоставляемых абоненту; каждый пакет содержит идентификатор абонента и предназначен для конкретного пользователя.
- пользователь передаёт и получает информацию пакетами; во время пауз (англ. *Off*) канал связи занимают другие абоненты.
- скорость передачи данных в пакете может изменяться, достигая 160 кбит/с (абоненту может выделяться до 8 TS на одной частоте).
- скорости передачи в направлениях "вверх" и "вниз", как правило, разные, например, 64 кбит/с в направлении BSS => MS и 3 кбит/с в направлении MS => BSS, причём асимметричные каналы обычно выделяют при доступе в Интернет.
- стоимость сервиса зависит от объёма переданной информации, QoS сеанса связи и общего времени подключения к сети.
- абонентская станция виртуально подключена к сети Интернет и на время сеанса связи получает интернет-адрес.

5.2 EDGE

EDGE (англ. *Enhanced Data Rates for Global Evolution*) – технология, разработанная для увеличения скорости передачи данных в радиоканале, которая предусматривает замену вида модуляции GMSK (в GSM/GPRS) на 8-позиционную фазовую манипуляцию 8-PSK (англ. Phase-Shift Keying).

Это позволяет при сохранении символьной скорости передачи в радиоканале 171 кбит/с повысить скорость передачи данных в 3 раза.

В технологии EDGE появляются новые каналы передачи данных E-TCH (англ. *Enhanced Traffic Channel*), скорости которых равны 28,8; 32 и 43,2 кбит/с в одном временном интервале.

В сочетании с избыточным кодированием и использованием нескольких TS достигаются скорости передачи данных до 400 кбит/с.

Диаграмма сигналов при 8-PSK

Сигнальная диаграмма модуляции в технологии EDGE представлена на рис. 4.12.

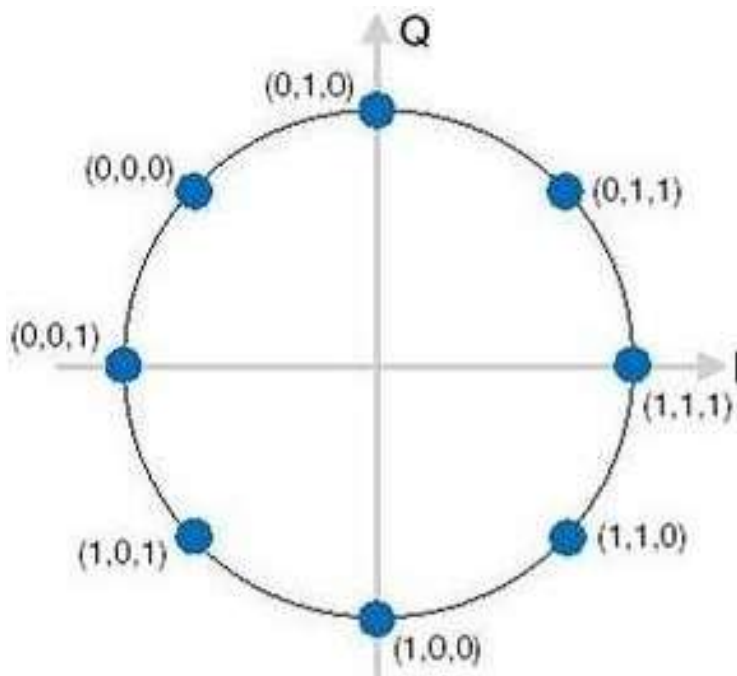


Рис. 4.12. Сигнальная диаграмма 8-PSK

Модуляция 8-PSK имеет меньшую помехозащищённость, чем Гауссова частотная манипуляция, в связи с этим её следует применять в каналах со значительным отношением сигнал/помеха.

Если при скорости передачи в одном временном интервале 9 кбит/с требовалось защитное отношение сигнал/помеха 9 дБ, то при применении 8-PSK необходимое защитное отношение возрастает до 15–17 дБ.

Исходя из этого, в сетях GSM/EDGE организуют адаптивное изменение скорости передачи в соответствии с вариациями характеристик канала связи. В сетях с пакетной коммутацией GPRS + EDGE (EGPRS) используют специальные **схемы модуляции и кодирования** MCS (англ. *Modulation & Coding Scheme*), что позволяет вести передачу с оптимальной скоростью.

VI СЕТИ 3G IMT-2000 (UMTS)

Работы по исследованию и разработке сетей 3G проводились Международным союзом электросвязи (МСЭ), начиная с 1980-х годов.

Результатом явилась спецификация **IMT-2000** (англ. *International Mobile Telecommunications – 2000*), в которой объединены стандарты, использующиеся в различных странах.

В общем случае в IMT-2000 входят пять стандартов (**UMTS/WCDMA**, **CDMA2000/IMT-MC**, **TD-CDMA/TD-SCDMA**, **DECT** и **UWC-136**), но широкое распространение получили только два из них:

- CDMA2000 (в США и Японии);
- UMTS (в Европе).

В 1999 году организации ряда стран, а именно: Японии, Китая, США, Кореи и некоторых европейских стран, договорились о создании общего стандарта UMTS. Для работ по стандартизации 3G была создана международная группа 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*).

Проектом выдвинуты **следующие требования** к сетям 3G:

- открытость и универсальность интерфейсов;
- поддержка мультимедийной среды;
- обеспечение широкополосного доступа;
- совместимость с сетями GSM и ISDN;
- независимость предоставляемых пользователю услуг от технологий радиодоступа.

Стандарт 3-го поколения (3G) UMTS (англ. *Universal Mobile Telecommunications System*) — Универсальная Мобильная Телекоммуникационная Система функционирует на базе действующих сетей GSM (рис. 4.13).

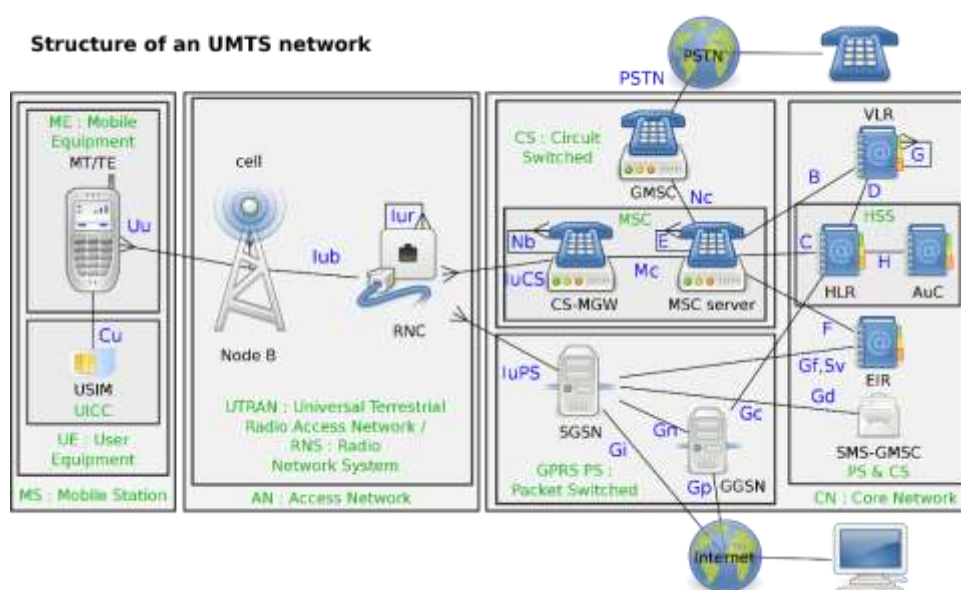


Рис. 4.13. Структура 3G сети

Поверх сети стандарта GSM, состоящей из коммутаторов каналов MSC/VLR, GMSC и коммутаторов пакетов SGSN, GGSN, составляющих **ядро сети** CN (англ. *Core Network*), подключены как подсети базовых станций GSM BSS, так и наложенные на них сети радиодоступа UTRAN (англ. *UMTS Terrestrial Radio Access Network*) (рис. 4.14).

Сети UTRAN могут функционировать в режиме UTRA-FDD и UTRA-TDD с интегрированной сетью (GSM/GPRS/UMTS)

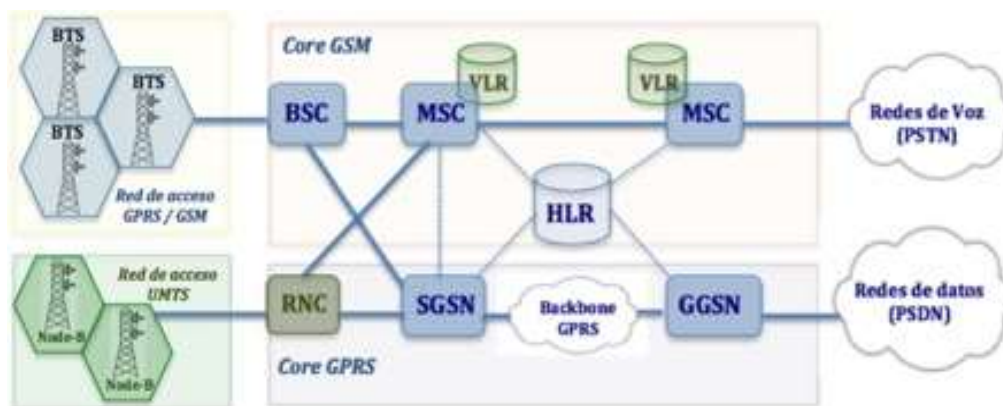


Рис. 4.14. Подключение базовых станций GSM BSS и сети радиодоступа UTRAN

6.1 Радиоинтерфейс в сетях 3G

Канал UMTS построен на основе **широкополосного множественного доступа с кодовым разделением** WCDMA (англ. *Wideband Code Division Multiple Access*).

Стандарты с кодовым разделением каналов позволили на порядок расширить полосу рабочих частот в радиоканале по сравнению с сетями стандарта GSM и тем самым на порядок увеличить скорости передачи данных. Широкие возможности в организации высокоскоростных каналов связи вместе с необходимостью адаптивного управления для достижения высокой эффективности работы CDMA сетей являются характерными чертами стандартов сотовой связи 3-го поколения.

Кодовое разделение канала CDMA

Множественный доступ с кодовым разделением CDMA (англ. *Code Division Multiple Access*) – это способ, при котором все абоненты одновременно используют одну полосу частот, но разные кодирующие последовательности.

Кодовые последовательности $c_1(t)$, $c_2(t)$, $c_3(t)$ представляют собой группу ортогональных последовательностей, имеющих следующее свойство:

$$\sum_{i=1}^n c_j(i) \times c_k(i) = \begin{cases} n, & \text{если } j = k \\ 0, & \text{если } j \neq k \end{cases}$$

В UMTS в качестве кодирующих последовательностей приняты функции Уолша, являющиеся строго ортогональными, каждая из которых кусочно-постоянна и принимает на промежутках постоянства значения $+1$ или -1 . Рис. 4.15 иллюстрирует пример приёма-передачи одной и той же закодированной последовательности разными абонентами.

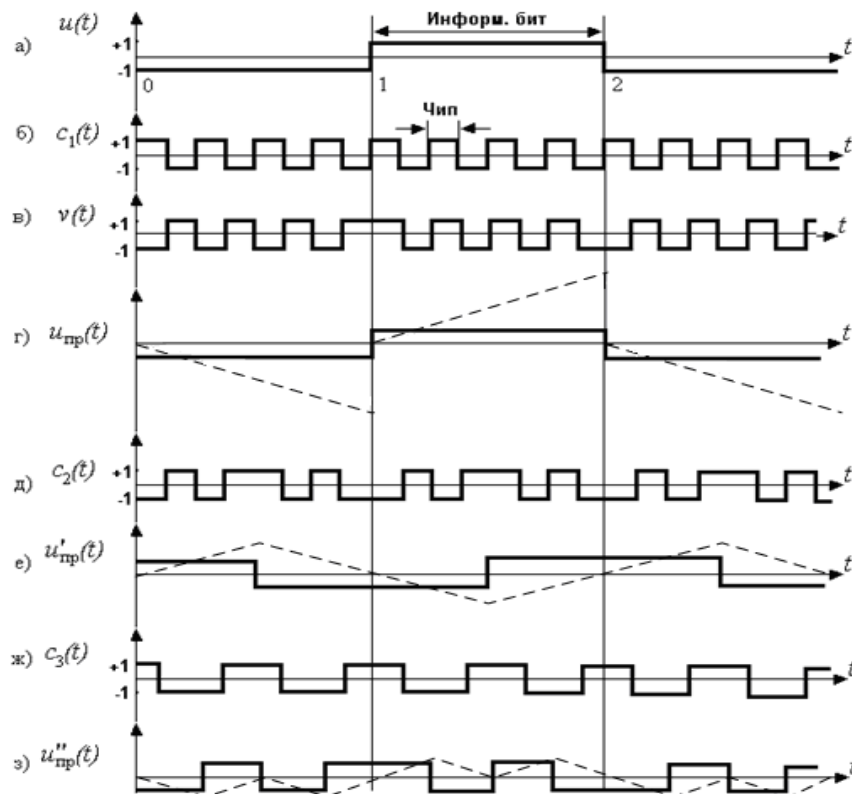


Рис.4.15. Пример разделения сигналов с помощью кодов: а – входная информационная последовательность; б – кодирующая последовательность; в – результат перемножения а и б (после модуляции будет отправлен в канал); г – принятая последовательность, результат перемножения принятого сигнала с той же кодовой последовательностью (пунктирной линией показан результат интегрирования на интервале одного символа); д – кодирующая последовательность, выделенная другому абоненту; е – результат перемножения принятого сигнала с “чужой” кодирующей последовательностью д (пунктир в конце каждого интервала приводит к нулю); ж и з – та же ситуация, что на д и е с другой кодовой последовательностью

6.2 Характеристики WCDMA

Диапазоны частот (РФ):

- Uplink 1920 – 1980 МГц;
- Downlink 2110 – 2170 МГц.

Ширина частотного канала: 5 МГц;

Модуляция: QPSK.

Мощность передатчика:

- АС 24 дБм;
- БС 43 дБм.

Скорость передачи данных в режиме UMTS составляет не более 2 Мбит/с (для неподвижного абонента), а при движении абонента, в зависимости от скорости, может опуститься до 144 Кбит/с.

Непарные частоты используются для организации радиointерфейса IMT-TC (IMT-2000 Time-Code) — кодово-временное разделение каналов TDMA/CDMA с временным дуплексным разнесом (TDD).

6.3 Надстройки над 3G (3.5-3.75G)

На сегодняшний день широко используется **технология высокоскоростного пакетного доступа** HSPA (англ. *High Speed Packet data Access*), позволяющая достичь более высоких скоростей передачи данных. В связи с этим HSPA известна как технология 3,5G или супер 3G.

Технология HSPA включает в себя стандарты HSDPA (нисходящий поток) и HSUPA (восходящий поток).

Стандарт HSDPA был утверждён в 2002 году и предоставляет скорость передачи данных от 1,8 Мбит/с до 14,4 Мбит/с (до 21 Мбит/с).

Стандарт 2004 года HSUPA поддерживает скорость до 5,7 Мбит/с.

Развитием HSPA является технология HSPA+, обеспечивающая скорость передачи данных от базовой станции до абонента 42 Мбит/с, 84 Мбит/с, 168 Мбит/с, и в обратном направлении до 24 Мбит/с.

Повышение скорости достигается за счёт применения методов модуляции 16QAM, 64QAM, **объединения полосы частот, гибридного контроля подтверждения получения данных** HARQ (англ. *Hybrid Automatic Repeat Request*) и применения **технологии MIMO** (англ. *Multiple Input Multiple Output*).

В России хотят полностью отключить сети 3G в 2027-2030 годах

Ранее сообщалось, что до 2030 года сети 3G отключит большинство операторов мобильной связи

Сети 3G в России намерены полностью отключить в 2027–2030 годах в рамках плана по перспективному использованию радиоэлектронных средств. Об этом сообщил директор департамента госрегулирования телеком-рынка Минцифры РФ Дмитрий Тур. Его слова цитирует ТАСС.

План перспективного использования радиоэлектронных средств был одобрен Госкомиссией по радиочастотам.

Летом этого года Минцифры опубликовало проект стратегии развития отрасли связи до 2035 года. В документе говорится, что до 2030 года сети 3G отключит большинство операторов мобильной связи. Они будут использовать высвободившийся радиочастотный ресурс для более эффективных и современных 4G и 5G.

VII Pre-4G СТАНДАРТ LTE

LTE (англ. Long Term Evolution) – долговременная эволюция считается логическим развитием технологии 3G (3GPP Release 8-9).

Основными целями создания стандарта LTE можно назвать:

- наращивание возможностей высокоскоростных систем мобильной связи;
- уменьшение стоимости передачи данных;
- возможность предоставления широкого спектра недорогих услуг;
- повышение гибкости использования уже существующих систем.

LTE отличается от 3G повышенной ёмкостью, лучшим использованием частотного спектра и меньшей задержкой при передаче пакетов данных.

7.1 Архитектура SAE (System Architecture Evolution)

Эволюционная архитектура сети LTE представлена на рис. 4.16.

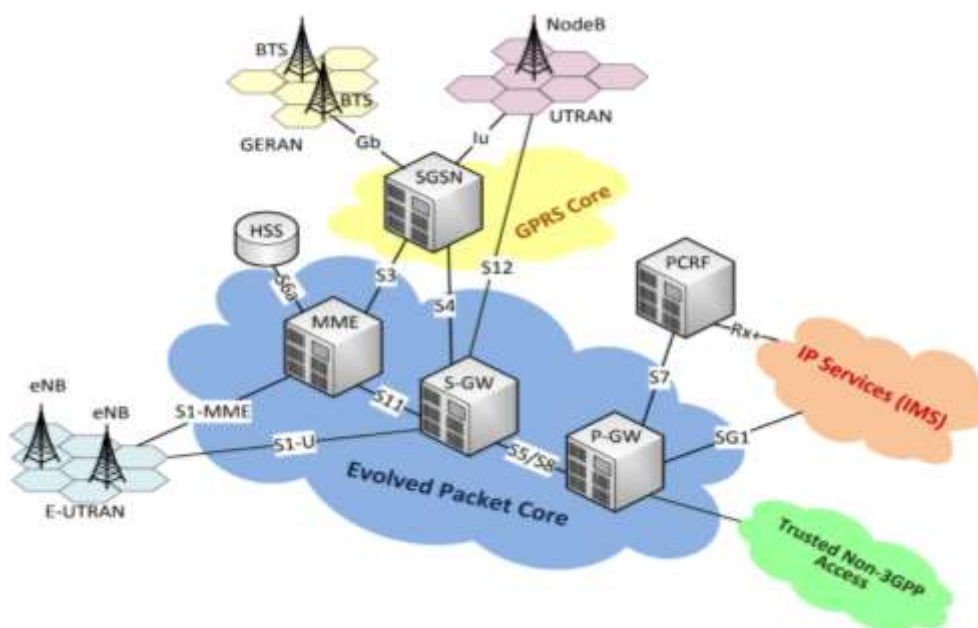


Рис. 4.16. Архитектура SAE

Функции eNodeB (Evolved NodeB)

eNodeB объединяет в себе функции базовых станций (nodeB) и контроллеров сетей (RNC) 3-го поколения:

- обеспечивает передачу трафика и сигнализации по радиоканалу;
- управляет распределением радиоресурсов;
- обеспечивает сквозной канал трафика к S-GW;
- поддерживает синхронизацию передач и контролирует уровень помех в соте;
- обеспечивает шифрование и целостность передачи по радиоканалу;

- выбирает ММЕ и организует сигнальный обмен с ним;
- производит сжатие заголовков IP-пакетов;
- поддерживает услуги мультимедийного вещания;
- при использовании структуры с усилителями мощности на антенной мачте организует управление антеннами по специальному интерфейсу I_{uant} .

Функции обслуживающего шлюза S-GW:

- маршрутизация передаваемых пакетов данных;
- установка качественных показателей (Quality of Service, QoS) предоставляемых услуг;
- буферизация пакетов для UE, пребывающих в состоянии Idle Mode;
- предоставление учетных данных для тарификации и оплаты выполненных услуг.

Шлюз для выхода в пакетные сети P-GW

P-GW организует точку доступа к внешним IP-сетям.

Функции ММЕ (Mobility Management Entity)

Блок управления мобильностью ММЕ поддерживает выполнение процедур протокола Mobility Management:

- обеспечение безопасности работы в сети при подключении UE и выбор S-GW, P-GW;
- ММЕ связан с HSS своей сети посредством интерфейса S6a
- интерфейс S10, соединяющий различные ММЕ, позволяет обслуживать UE при перемещениях абонента, а также при его нахождении в роуминге.

Функции PCRF:

Policy and Charging Resource Function PCRF представляет собой управляющий сервер, обеспечивающий централизованное управление ресурсами сети, учёт и тарификацию предоставляемых услуг.

Как только появляется запрос на новое активное соединение, эта информация поступает на PCRF.

Он оценивает имеющиеся в его распоряжении ресурсы сети и направляет в PCRF шлюза P-GW команды, устанавливающие требования к качеству услуг и к их тарификации.

7.2 Характеристики LTE

Скорость передачи: 326.4 Мбит/с.

Диапазоны частот

Распределение частот, выделенных для систем мобильной связи LTE,

можно видеть на рис 4.17.

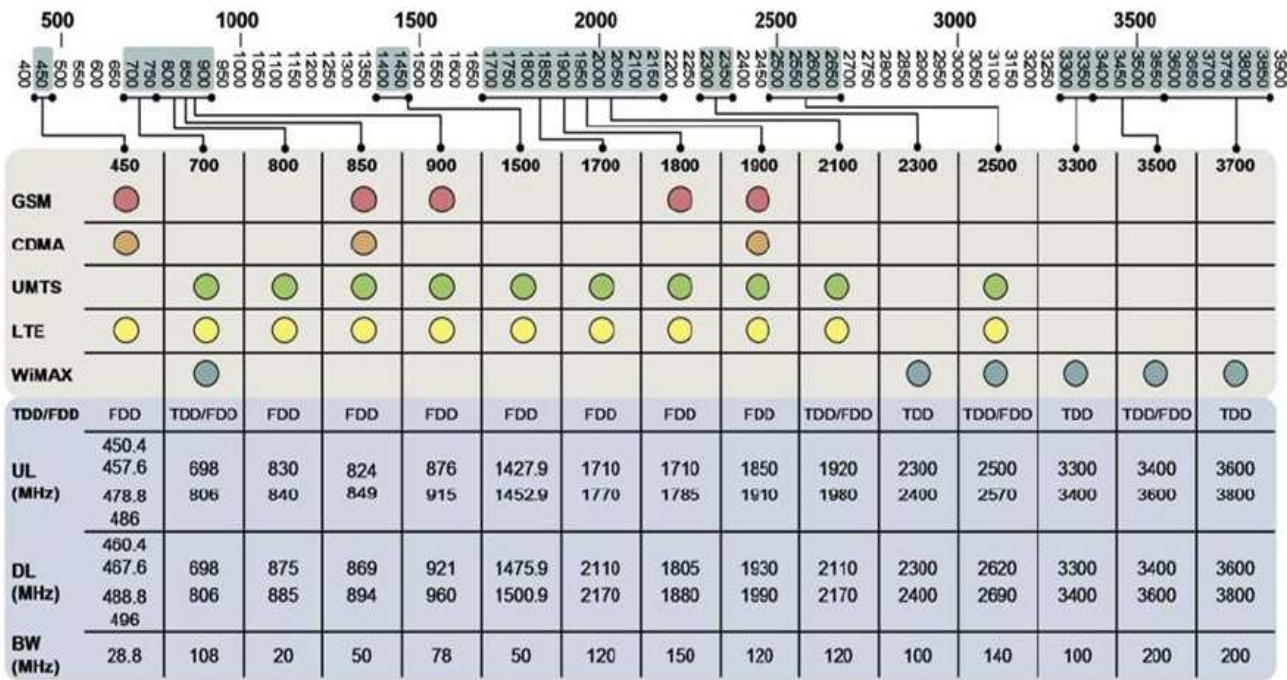


Рис. 4.17. Диапазоны частот в мире для систем LTE

В России LTE работают на специально выделенных каналах связи: 800, 1800 и 2600 МГц, которые не совместимы со стандартами предыдущих поколений.

Диапазоны частот LTE в России

Рис. 4.18 демонстрирует принятые большинством российских операторов мобильной связи диапазоны частот для реализации LTE.



Рис. 4.18. Диапазоны частот, принятые у российских операторов для систем LTE

7.3 Физический уровень

На физическом уровне (на участке между UE и eNodeB) в стандарте LTE применяют технологию мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов OFDM (англ. *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) с модуляцией QPSK, 16-QAM и 64-QAM.

Максимальное количество поднесущих частот в рабочей полосе может быть равно 2048.

С целью достижения взаимной синхронизации E-UTRA и UTRA применяют тактирование с длительностью временной единицы $T_s = 1/(15000 \times 2048)$ с.

Передача по радиоканалу производится кадрами длительностью 10 мс, что равно $307200T_s$.

7.4 Структуры кадров LTE

Кадры в LTE подразделяются на 2 типа:

- с частотным дуплексом FDD (англ. *Frequency Division Duplex*);
- с временным дуплексом TDD (англ. *Time Division Duplex*).

Структура кадра с частотным дуплексом (FDD):

Кадр включает 20 **временных слотов** длительностью $15360 \times T_s = 0,5$ мс, пронумерованных от 0 до 19. Два последовательных слота представляют собой 1 субкадр (рис. 4.19-4.20). Всего в кадре 10 субкадров, с номерами от 0 до 9.

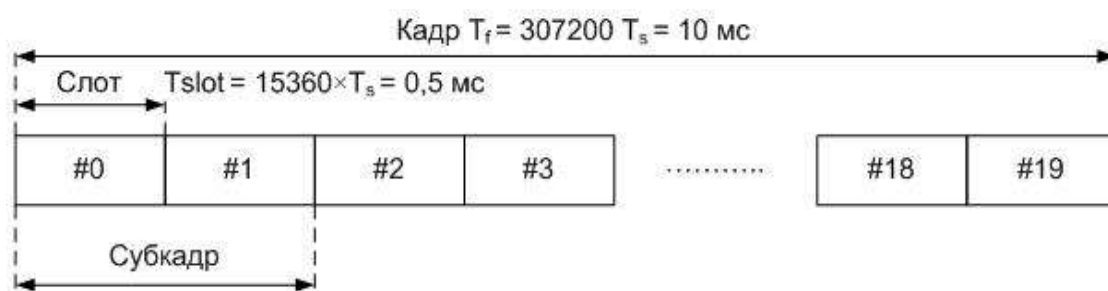


Рис. 4.19. Структура кадра FDD



Рис. 4.20. Структура радиокadra

Структура кадра при временном дуплексе (TDD):

Кадр длиной 10 мс также как в FDD включает 10 субкадров длиной 1 мс, но в отличие от него в некоторых субкадрах происходит передача вниз (D), в других – вверх (U) (рис. 4.21).

Кроме того, есть специальные субкадры (S), в состав которых входит три поля:

- UpPTS – пилот передачи вверх;
- DwPTS – пилот передачи вниз;

– GP – защитный интервал.

Всего при временном дуплексе возможно 7 конфигураций кадров (табл. 4.1).

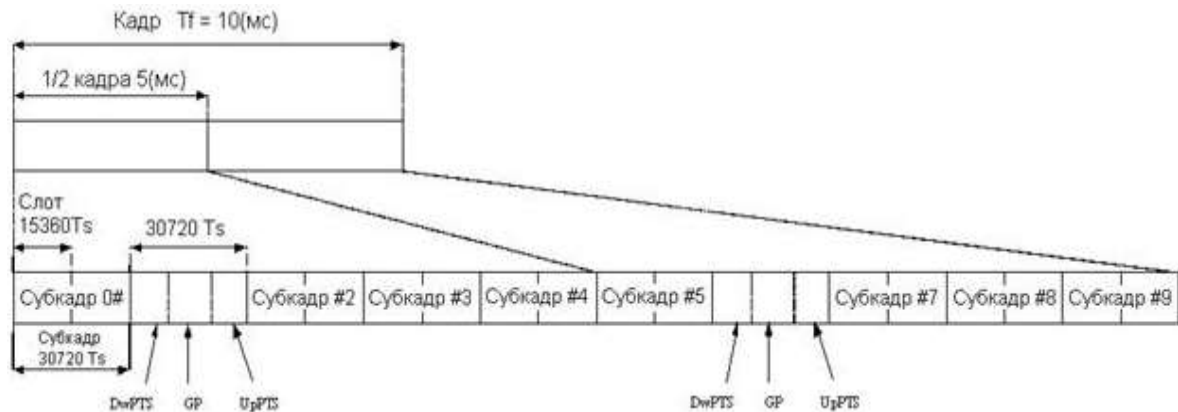


Рис. 4.21. Структура кадра TDD

Таблица 4.1. Конфигурации кадра в LTE при временном дуплексе (TDD)

Конфигурация вверх-вниз	Периодичность вверх-вниз	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 мс	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 мс	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 мс	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 мс	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 мс	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

Поскольку расстояние между поднесущими составляет $\Delta F = 15$ кГц, длина OFDM-символа равна $1/\Delta F \approx 66,7$ мкс.

Половина субкадра (слот длительностью 0,5 мс) состоит из 6 или 7 OFDM-символов в зависимости от величины **циклического префикса** CP (англ. *Cyclic Prefix*) и активной паузы между символами.

Значение циклического префикса TCP равно $160T_s \approx 5,2$ мкс перед первым символом и $144T_s \approx 4,7$ мкс – перед остальными символами.

Возможен также вариант применения расширенного CP, равного $512T_s \approx 16,7$ мкс.

Типичные примеры субкадра:

Рис. 4.22 содержит примеры субкадров с различными значениями циклического префикса.

7.5 Канальные ресурсы LTE по линии “вниз” OFDM

Существующий каналный ресурс состоит из **ресурсных блоков** (РБ), каждый из которых включает 12 расположенных рядом поднесущих,

занимающих полосу 180 кГц и одного временного слота (7 или 6 OFDM-символов на интервале 0,5 мс).

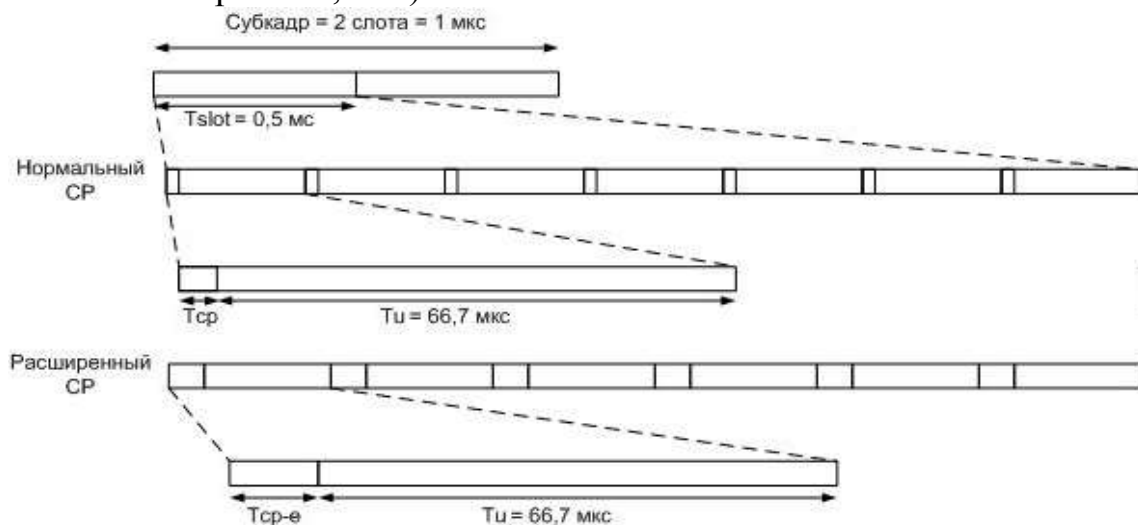


Рис 4.22. Структура тайм-слота

Ресурсный блок и ресурсный элемент

Каждый OFDM-символ представляет собой *ресурсный элемент* (РЭ), параметрами которого являются 2 значения: $\{k, l\}$, где k указывает на номер поднесущей, а l – номер символа в ресурсном блоке (рис. 4.23).

Ресурсный блок на линии «вниз» состоит из $12 \times 7 = 84$ ресурсных элементов, некоторые из которых применяют для отправки опорных (англ. *reference*) символов (рис. 4.24). Выделяемый каналный ресурс определяют количеством ресурсных блоков или групп ресурсных блоков.

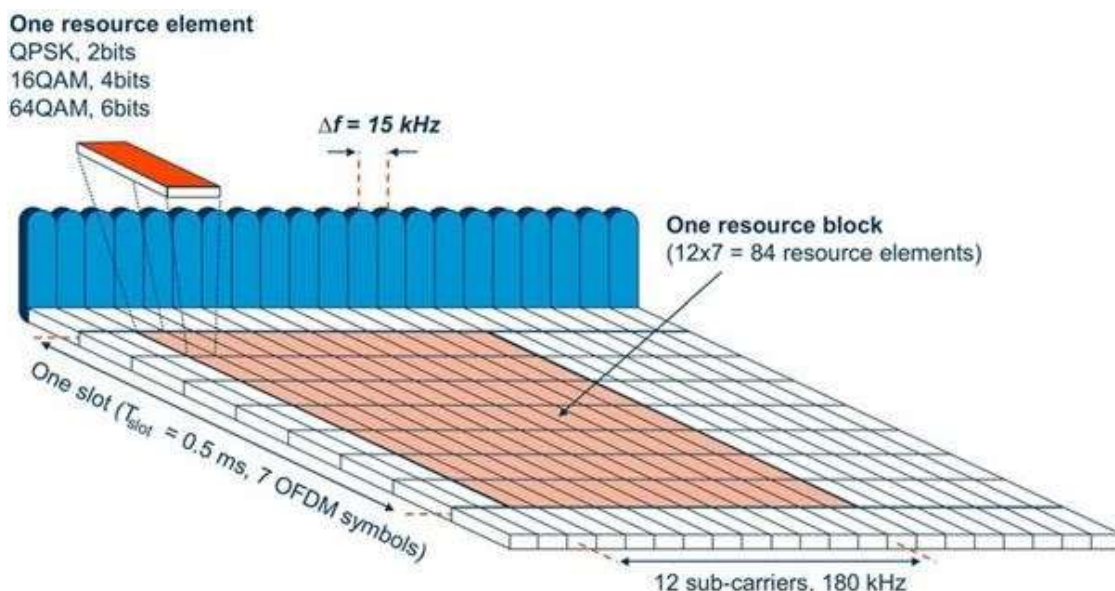


Рис. 4.23. Структура ресурсных элементов и блоков

7.6 Радиointерфейс LTE по линии “вверх” SC-FDMA

Канальный ресурс UpLink также выделяют ресурсными блоками (12 поднесущих общей полосой 180 кГц в слоте), и субкадрами длительностью 1 мс с 7-ю или 6-ю OFDM-символами в каждом слоте.

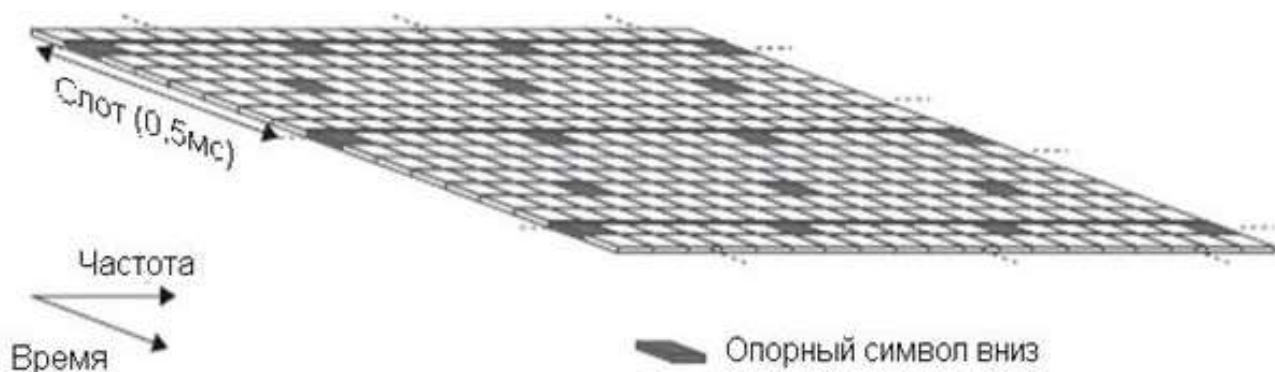


Рис. 4.24. Структура ресурсных элементов и опорных символов

Пример распределения канального ресурса между разными абонентами:

Во время передачи по линии «вверх» применяют изменённую технологию OFDM, а фактически производят передачу широкополосного сигнала на одной несущей (рис. 4.25).

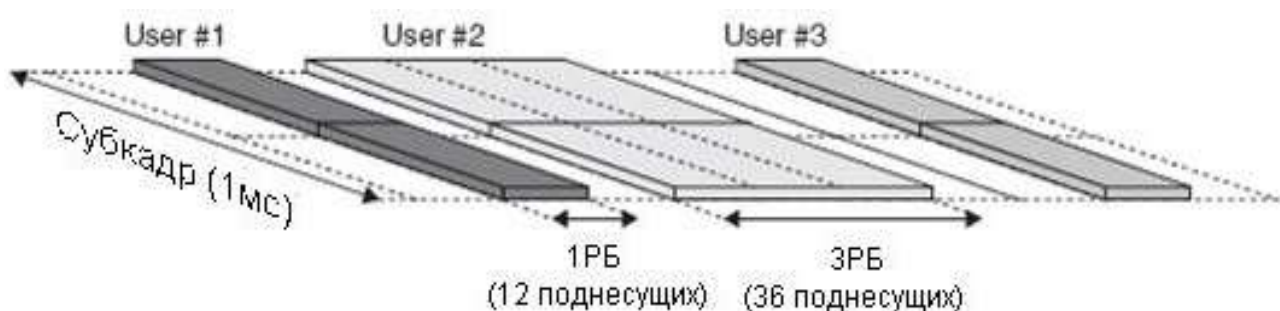


Рис. 4.25. Распределение канального ресурса на линии “вверх”

Задачей данного метода является уменьшение пик-фактора передаваемого сигнала, т.к. большой пик-фактор – это значительный «минус» технологии OFDM. В связи с этим до формирования сигнала OFDM производят прямое быстрое (дискретное) преобразование Фурье передаваемого сигнала (БПФ), в затем переходят к OFDM (рис. 4.26).

Данная технология называется БПФ-OFDM или SC-FDMA (англ. *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*).

7.7 Масштабируемость полосы LTE

Важнейшей особенностью сетей LTE является масштабируемость занимаемого ими частотного спектра от 1.4 до 20 МГц (возможные полосы – 1.4, 3, 5, 10, 15 и 20 МГц), которая способствует быстрому внедрению технологии в условиях ограниченности радиоресурсов.

Очевидно, что, чем шире полоса, тем больше будет скорость.

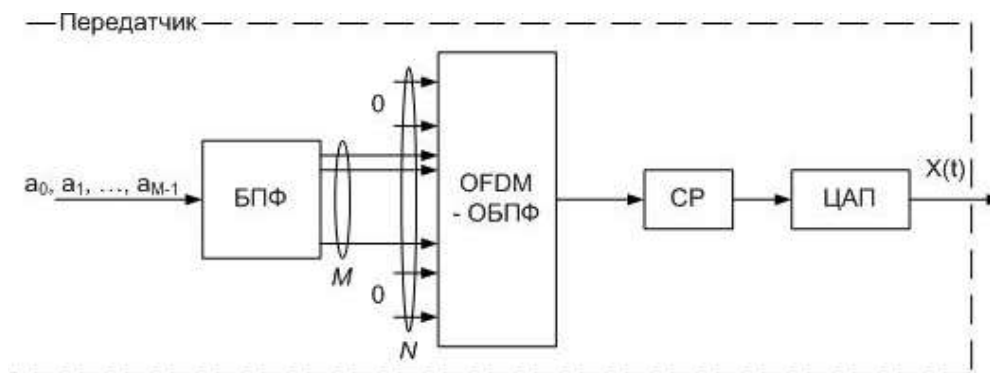


Рис. 4.26. Формирование сигнала SC-FDMA

В таблице 4.2 приведены соотношения между шириной полосы и количеством поднесущих и ресурсных блоков (ресурсный блок – это 12 поднесущих в частотной области и один тайм-слот или 7 OFDM-символов во временной области).

Таблица 4.2. Соотношение между шириной полосы частот и числом ресурсных блоков

Полоса, МГц	1.4	3	5	10	15	20
Число поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100

7.8 MIMO в LTE

Немаловажным фактором при оценке возможностей LTE является применение технологии MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output).

Существуют несколько вариантов применения MIMO – для увеличения абонентской ёмкости, при этом с разных антенн передаётся различная информация, и для улучшения покрытия (рис. 4.27).



Рис. 4.27. MIMO

В последнем случае с нескольких антенн передаётся одна и та же информация, что позволяет абонентскому устройству комбинировать сигнал с разных антенн, улучшая его качество (рис. 4.28).

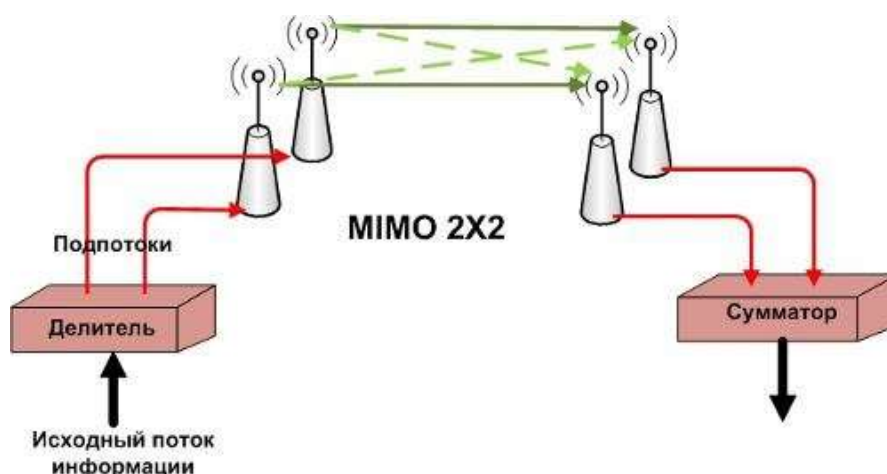


Рис. 4.28. Повышение качества сигнала с помощью MIMO

VIII 4G LTE-Advanced (3GPP Release 10)

Для выполнения требований 3GPP к повышению скорости передачи данных в каналах радиointерфейса сети LTE Advanced до 1 Гбит/с в линиях “вниз”/”вверх” при сохранении методов формирования сигналов и кодирования, применённых в сетях LTE, в сети LTE-Advanced необходимо использовать новые каналы, более широкополосные, сформированные на основе принципа агрегации (группирования) несущих.

Реализация этого условия обеспечивает совместимость и преемственность оборудования при переходе (развитии) от технологии LTE к технологии LTE-Advanced.

Принцип агрегации частотных каналов в сетях LTE-Advanced (Release 10) заключается в объединении спектров N частотных каналов сети LTE для различных сценариев использования частотного ресурса и диапазонов частот, определенных Техническими спецификациями 3GPP. При этом спектральная эффективность сети LTE-Advanced не увеличивается относительно спектральной эффективности сети LTE (Release 8).

Возможности технологии LTE-Advanced шире возможностей технологии LTE благодаря **агрегации базовых частотных каналов** сети LTE, называемых **компонентными несущими** (англ. *carrier aggregation*).

При этом две компонентные несущие или более агрегируются в целях создания широкополосного канала передачи данных с шириной до 100 МГц и формирования спектра соответствующего сложного сигнала.

В этом случае абонентские терминалы в сетях LTE-Advanced должны одновременно принимать одну или несколько компонентных несущих (в зависимости от пропускной способности терминалов).

В требованиях к радиоканалам, специфицированных 3GPP для агрегации компонентных несущих, определены две возможности агрегации: прилегающих и не прилегающих друг к другу частотных каналов LTE.

Разрешённые для агрегации частотные каналы, используемые при создании компонентных несущих в сетях LTE-Advanced, имеют типовые значения ширины частотных каналов LTE для соответствующих частотных диапазонов: 1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц и 20 МГц.

Возможны три типа агрегирования:

- агрегирование смежных компонент внутри одной полосы частот (intra-band adjacent);
- агрегирование несмежных компонент внутри одной полосы частот (intra-band non-adjacent);
- агрегирование компонент в разных полосах (диапазонах) частот (inter-band) (рис. 4.29).

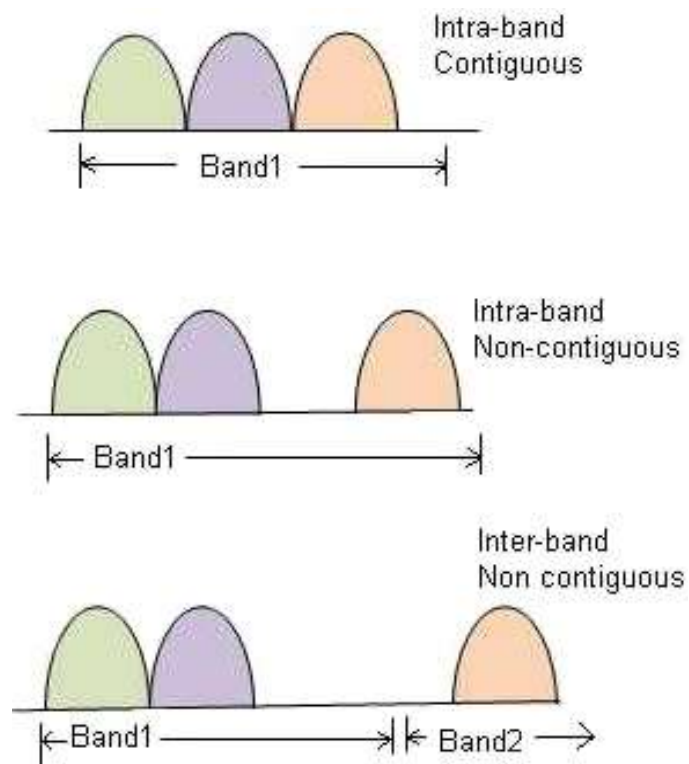


Рис. 4.29. Агрегирование частот

Характеристики LTE-A:

ММО:	8x8;
Модуляция:	до 4096-QAM;
Ширина канала:	до 100 МГц;
Скорость:	1 Гбит/с (3 Гбит/с);
Спектральная эффективность:	до 15 бит/с/Гц.