

**Р. Ю. КУРНОСОВ, Т. И. ЧЕРНЫШОВА, М. А. КАМЕНСКАЯ,
С. В. АРТЕМОВА**

**ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ
ИНФОКОММУКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И
СЕТЕЙ**

**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

**Р. Ю. КУРНОСОВ, Т. И. ЧЕРНЫШОВА, М. А. КАМЕНСКАЯ,
С. В. АРТЕМОВА**

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОКОММУКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов 3, 4 курсов, обучающимся по
направлениям подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и
системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных
средств», очной и заочной форм обучения

Учебное электронное издание



**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2023**

УДК 621.396.029
ББК 32.965.07
О-75

Рецензенты:

Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы»
ФГБОУ ВО «РГАТУ им. П. А. Соловьева»
А. В. Печаткин

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Энергообеспечение предприятий и теплотехника»
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
А. Н. Грибков

О-75 **Основы** построения инфокоммуникационных систем и сетей [Электронный ресурс] : учебное пособие / Р. Ю. Курносков, Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, С. В. Артемова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 4,1 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.
ISBN 978-5-8265-2554-8

Изложены основные определения и общие сведения в области телекоммуникаций, дана их классификация, описаны положения расчёта линии радиосвязи, а также рассмотрены основные концепции, определяющие современное развитие инфокоммуникационных систем и сетей. Особое внимание уделено принципам построения и проектирования инфокоммуникационных систем и телекоммуникационных транспортных сетей и сетей доступа, а также существующим проблемам управления сетями. В приложении представлены задания к курсовому проектированию и лабораторным работам по курсу «Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей». Каждая отдельная лабораторная работа снабжена подробным теоретическим материалом, позволяющим выполнить практические задания. Для подготовки к защите отчёта по выполненной работе по каждому заданию составлен примерный перечень контрольных вопросов.

Предназначено для студентов 3, 4 курсов, обучающихся по направлениям подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств», очной и заочной форм обучения.

УДК 621.396.029
ББК 32.965.07

Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком. Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.

ISBN 978-5-8265-2554-8

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АЛ – абонентская линия
АТС – автоматическая телефонная станция
АТСЭ – автоматическая телефонная станция электронная
АЦП – аналогово-цифровое преобразование
БД – база данных
БС – базовая станция
БПП – блок приёмопередатчика
ДМВ – дециметровые волны
ЗС – земная станция
ЕСЭ – единая сеть электросвязи
ИКМ – импульсно-кодовая модуляция ИСО (Международная организация по стандартизации)
КБС – контроллер базовой станции
МС – мобильная станция
МВ – метровые волны
МККГТТ – Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии
ОВЧ – очень высокие частоты
ОМС – центр управления и обслуживания
ОЦК – основной цифровой канал
ПЭП – процедура эстафетной передачи
ПА – подвижный абонент
ПП – приёмопередатчик
РРЛ – радиорелейная линия
РСК – ромб совмещённого канала
СБС – система базовой станции
ССПО – средства связи с подвижными объектами
СПР – сети персонального радиовызова
СПС – сеть подвижной радиотелефонной связи
ССОП – сеть связи общего пользования
ТКС – телекоммуникационные системы
ТфОП – телефонная сеть общего пользования
ЧТП – частотно-территориальный план
ЦКПС – центр коммутации подвижной связи
ТШ – собственные тепловые шумы приёмника
ТЭ – техническая эксплуатация (maintenance)
УИВС – узел исходящих–входящих сообщений
УКВ – ультракоротковолновый диапазон радиочастот
УС – узел связи
УВЧ – ультравысокие частоты
УММС – усредненная медианная мощность сигнала
ФО – федеральный округ России или функциональный объект в NGN
ШПД – широкополосный доступ
ЭИИМ – эквивалентная изотропная излучаемая мощность
ЭМВОС – эталонная модель взаимодействия открытых систем
AUC (Authentication Center) – центр аутентификации
BSS (Base Station Subsystem) – оборудование базовой станции

CDMA (Code Division Multiple Access) – множественный доступ с кодовым разделением (МДКР)

DAMPS (Digital Advanced Mobile Phone Service) – цифровой стандарт мобильной связи в диапазоне частот от 400 до 890 МГц

eNodeB (eNB) – базовая станция сети стандарта LTE

EUTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) – усовершенствованный беспроводной интерфейс 3GPP (LTE)

EIR (Equipment Identification Register) – регистр идентификации оборудования

HLR (Home Location Register) – домашний локальный регистр

IMSI (International Mobile Subscriber Identity) – международный идентификационный номер

GSM (Global System for Mobile Communications) – глобальная система для мобильной связи

FDD (Frequency–Division for Duplex) – частотное мультиплексирование каналов для обеспечения дуплексной связи

FDDI (Fiber Distributed Data Interface) – распределённый волоконный интерфейс данных

FDM (Frequency–Division Multiplexing) – частотное мультиплексирование каналов

FTTP (Fiber To The Premises) – доведение волокна до точки присутствия клиента

FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications Systems) – будущие наземные мобильные телекоммуникационные системы общего пользования

ISDN (Integrated Services Digital Network) – цифровая сеть с интеграцией служб

ITU–T (International Telecommunication Union – Telecommunication sector) – сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи

MCW (Multiple Code Word) – многокодовое слово

MME (Mobility Management Entity) – подвижный объект управления

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – метод пространственного кодирования сигнала

MSC (Mobile Switching Center) – центр коммутации подвижной сети

PSTN (Public Switched Telephone Network) – телефонная сеть общего пользования

PDN (Public Data Network) – сеть передачи данных общего пользования

VAD (Voice Activity Detector) – детектор речевой активности

VLР (Visitor Location Register) – регистр перемещения

TDD (Time Division Duplex) – временное разделение каналов

TDMA (Time Division Multiple Access) – множественный доступ с разделением по времени

SMS (Short message service) – служба коротких сообщений

SSS (Switching Station Subsystem) – подсистема коммутации

SIM (Subscriber Identity Module) – модуль подлинности абонента

SFH (Slow–Frequency Hopping) – медленная перестройка рабочих частот

STC (Space Time Coding) – пространственно-временное кодирование

SCW (Single Code Word) – однокодовое слово

UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems) – универсальная система мобильной связи

RC (Radio Configuration) – набор параметров модуляции расширения спектра

SR (Spreading Rate) – число несущих

BPSK (Binary Phase Shift Keying) – двоичная фазовая манипуляция

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурная фазовая манипуляция

PSK (Phase Shift Keying) – фазовая манипуляция

QAM (Quadrature – Amplitude Modulation) – квадратурная амплитудная манипуляция

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым компонентом в развитии современных технологий являются информационные сети, вокруг которых выстроена телекоммуникационная инфраструктура. Развитие технологической базы в данном случае подразумевает совершенствование аналоговых и цифровых систем, обеспечивающих связь. Современная телекоммуникационная инфраструктура характеризуется высоким уровнем надёжности, безопасности и скорости передачи данных. Конвергенция информационных и коммуникационных технологий привела к появлению нового термина – «инфокоммуникационная сеть». Здесь важно отметить, что особенностью правильно организованной сети связи является способность связывать точки отдельных подсистем на больших расстояниях.

Под инфокоммуникациями понимается комплекс, органически объединяющий современные информационные, компьютерные и телекоммуникационные технологии, реализующие их системы и средства, предназначенные для предоставления организациям и населению информационных и коммуникационных продуктов и услуг. Таким образом, под инфокоммуникационными сетями будем понимать территориально распределённые комплексы технических средств и соединяющие их каналы связи различной физической природы, обеспечивающие генерацию, передачу, приём, хранение, поиск, отображение и обработку информации по заданным алгоритмам и программам, и предназначенные для предоставления пользователю и его организациям различных информационных и коммуникационных продуктов и услуг.

В последние годы наблюдается резкий рост числа пользователей сетей подвижной (мобильной) связи как у нас в стране, так и за рубежом. В ряде случаев такие сети целесообразно создавать не только для обеспечения связи между подвижными объектами, где таким сетям нет альтернативы, но и для организации связи между стационарными объектами. Система подвижной радиосвязи предназначена для обеспечения связи базовых станций и мобильных станций путём организации линий радиосвязи между ними – систем радиointерфейсов. Линии радиосвязи, входящие в состав сотовых систем связи с подвижными объектами и спутниковых систем связи, обычно работают в диапазонах ультравысоких частот и сверхвысоких частот и соответственно, в диапазонах дециметровых и сантиметровых волн. Параметры радиоканала, определённые при распространении радиоволн в свободном пространстве, не могут быть полностью использованы для расчёта радиолиний, так как не учитывают специфику сети персонального радиодоступа (СПР), определяемую, прежде всего, особенностями рельефа местности и городской застройки в зоне действия СПР. Поэтому расчёт осуществляется с применением моделей предсказания уровня принимаемого радиосигнала, учитывающих параметры рельефа (высоту препятствий, их форму и взаимное расположение, наклон местности, характер жилой застройки, физические особенности поверхности и т.п.).

Несмотря на то, что телекоммуникационные технологии имеют узконаправленное применение в определённых областях, всё более актуальными ста-

новятся программы по внедрению технологий в целые отрасли. Конечно, в первую очередь такие системы используются при организации коммуникационной поддержки в СМИ, в промышленности, в учебных заведениях, в медицине и др. Современные телекоммуникационные технологии используются для обеспечения более эффективного взаимодействия между персоналом. Для обычных пользователей современная инфокоммуникационная сеть полезна для упрощения обслуживания и предоставления услуг.

Инфокоммуникационные сети – это новый этап развития телекоммуникационных и информационных технологий, порождённый выходом человечества к новой фазе своей эволюции – информационному обществу. Суть этого этапа развития заключается во всё большей интеграции телекоммуникационных и информационных технологий на пути создания единой инфокоммуникационной сети.

В настоящем учебном пособии даны указания к выполнению курсового проекта по дисциплине «Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей». В пояснительной записке объёмом 40 – 60 страниц машинописного текста, включая необходимые иллюстрирующие материалы (чертежи, схемы, диаграммы, графики, рисунки), студент должен в краткой и ясной форме грамотно изложить идеи и существо работы, привести результаты теоретических расчётов и экспериментальных исследований, сделать конкретные выводы, решив при этом следующие задачи.

1. Провести энергетический расчёт уровня радиосигнала в точке приёма для случая высокоподнятых антенн (детерминированный метод).

2. Обосновать выбор моделей для прогнозирования уровня радиосигнала и на основе выбранной модели провести расчёт уровня радиосигнала в точке приёма.

3. Выбрать модель кластера и рассчитать параметры частотно-территориального плана (отношения сигнал–интерференция и сигнал–шум, радиус зоны покрытия).

4. Описать состав оборудования базовой станции и используемых антенн.

Расчётно-пояснительная записка курсового проекта должна содержать следующие структурные части.

Текстовая часть:

- титульный лист;
- ведомость курсового проекта.
- задание на проектирование;
- аннотацию;
- основное содержание, отражающее результаты проектирования;
- условные обозначения, символы и сокращения;
- введёние (назначение ССПО, формулировка задач проектирования с привязкой их к исходным данным, определённым в задании);
- основную часть;
- заключение;
- библиографический список;
- приложение.

Графический материал:

- структурную схему оборудования базовой станции с вариантом размещения используемых антенн;
- частотно-территориальный план ССПО с указанием рассчитанных параметров.

Задание на проектирование представлено в виде вариантов исходных данных, задаваемых преподавателем.

Курсовой проект должен соответствовать выбранной теме, содержать все основные разделы и графический материал в соответствии с заданием, должен быть оформлен в соответствии с СТО ФГБОУ ВО «ТГТУ» 07–2017 «Выпускные квалификационные работы и курсовые проекты (работы). Общие требования».

Учебное пособие нацелено на формирование и закрепление следующих профессиональных компетенций обучаемых.

ПК-4. Способен осуществлять мониторинг состояния и проверку качества работы, проведение измерений и диагностику ошибок и отказов телекоммуникационного оборудования, сетевых устройств, программного обеспечения инфокоммуникаций.

Уметь анализировать результаты и устанавливать соответствие параметров работы оборудования действующим отраслевым нормативам.

Владеть навыками инструментальных измерений, используемых в области телекоммуникаций, и оценки их соответствия техническим нормам и параметрам оборудования и каналов передачи установленным эксплуатационно-техническим нормам, ведение документации по результатам измерений.

ПК-5. Способен осуществлять контроль использования и оценивать производительность сетевых устройств и программного обеспечения для коррекции производительности сетевой инфраструктуры инфокоммуникационной системы.

Уметь пользоваться нормативно-технической документацией в области инфокоммуникационных технологий.

Уметь использовать современные методы контроля и исследования производительности инфокоммуникационных систем.

Владеть навыками исследования влияния приложений на производительность сетевых устройств и программного обеспечения администрируемых сетевых устройств информационно-коммуникационных систем, фиксацию оценки готовности системы в специальном документе.

В результате освоения дисциплины «Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей» студент должен быть подготовлен к решению следующих задач: эффективное использование возможностей инфокоммуникационных технологий и систем для ориентации предприятий и организаций на предоставление услуг нового вида; развитие технологической и технической базы предприятий и организаций за счёт внедрения современных инфокоммуникационных технологий и систем; предупреждение угроз, возникающих в процессе внедрения и использования инфокоммуникационных технологий.

1. ОПИСАНИЕ СТАНДАРТОВ СВЯЗИ 1G И 2G

1.1. ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ. АНАЛОГОВЫЕ МОБИЛЬНЫЕ БЕСПРОВОДНЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Системы первого поколения были разработаны в 1970-х годах и основывались на аналоговом принципе, при этом использовались исключительно для телефонной связи. Лишь впоследствии эти системы стали способны обеспечивать некоторые базовые сервисы абоненту.

NMT-450 (Nordic Mobile Telephone) был разработан в 1978 г. и как аналоговый стандарт скандинавской мобильной телефонии введён в эксплуатацию:

- в 1981 г. – в Швеции (октябрь) и Норвегии (ноябрь);
- в 1982 г. – в Дании (январь), Финляндии (март) и Испании (июнь).

Однако первая сеть NMT-450 начала свою работу в сентябре 1981 г. в Саудовской Аравии, которую смонтировала и запустила Шведская компания Ericsson, принимавшая активное участие в создании аналоговых сетей в Скандинавии;

- в 1983 г. началась разработка системы NMT-900 с диапазоном 900 МГц. Эта система начала свою работу только в декабре 1986 г.

NMT-450 использует диапазон частот 453...457,5 МГц – для связи от телефона к базовой станции и 463...467,5 МГц – для связи от базовой станции к телефону. Частотный разнос каналов приёма и передачи – 10 МГц. Изначально использовалась сетка каналов с шагом 25 КГц, но с увеличением количества абонентов шаг сетки уменьшили до 12,5 КГц (использование интерливинга), добавляя между обычными каналами дополнительные, увеличив тем самым ёмкость сети. Таким образом, максимальная ёмкость одной базовой станции составляла 180 абонентов, а с учётом модернизации могла достигать 359. Мощность передатчиков абонентских устройств составляет 0,1...6,5 Вт. Столь малое количество каналов в пределах одной соты показывает, что стандарт не пригоден для крупных развитых городов с большой абонентской плотностью и больше всего подходит для малонаселённых районов.

Стандарт NMT-450 является аналоговым и относится к группе FDMA (Frequency Division Multiple Access – Множественный Доступ с Частотным Разделением) стандартов сотовой связи. У данной группы стандартов немало недостатков, но и достаточно много преимуществ по сравнению с другими группами (TDMA и CDMA). Основное преимущество NMT-450 – значительно большая площадь обслуживания одной базовой станции и соответственно меньшие затраты, а также малое затухание сигнала на открытом пространстве. Одним из важных преимуществ является возможность пользоваться связью на расстоянии нескольких десятков километров от базовой станции при благоприятных погодных условиях даже за пределами гарантированной зоны покрытия, если абонент может подключить высокоэффективные направленные антенны и усилители, очень выгодно для обширных территорий с низкой плотностью населения. Например, весьма неплохая связь может оказаться на расстоянии

70...80 км от базовой станции (телефон GSM-900, для сравнения не может работать на расстоянии более 35 км от базовой станции).

Обратной стороной медали является слабая помехоустойчивость, поскольку в этом частотном диапазоне уровень различного рода помех и их влияние выше, чем в диапазонах 800, 900 и 1800 МГц. Особенно это ощутимо в больших городах, где развита промышленная сеть, но стоит удалиться от города, и качество связи сильно улучшается и зачастую превосходит качество проводных телефонных сетей, поскольку каждому абоненту для разговора предоставляется в полное распоряжение отдельный полнодуплексный радиоканал. Габариты, вес, потребление энергии аккумуляторов у телефонных аппаратов стандарта NMT больше, чем в цифровых системах, а время работы соответственно меньше. Так же у данного стандарта меньшая, чем в цифровых стандартах системы связи (DCS – Digital Communication System), возможность предоставления широкого спектра услуг связи и управления, однако при повышении использованных частот, т.е. применяя стандарт NMT-900, стало возможным уменьшение габаритов радиотелефона, а также расширение сервисных услуг

(с течением времени в стандарт добавлялись различные сервисы: это и определение номера, и голосовая почта, факс-почта, конференц-связь, переадресация вызова, SMS, синхронизация часов и т.п.).

Характерной особенностью стандарта NMT является то, что все подвижные абоненты имеют возможность работать в любой из стран, входящих в систему, благодаря тому, что подвижные станции полностью совместимы со всеми базовыми станциями страны. В настоящее время более 40 стран мира используют системы сотовой подвижной связи стандартов NMT.

Доработанная версия стандарта получила обозначение NMT-450i. Основной её особенностью является применение так называемой SS N 7 (Сигнализации Номер 7 по спецификации МККТТ), что позволяет быстрее переключать абонентские станции на обслуживание другой базовой станцией при перемещениях абонента, выполнять функции их идентификации и снижать потребление энергии радиотелефонами. При этом увеличилась производительность системы связи, повысилось качество работы, проведена защита доступа к сети с помощью системы идентификации абонента, исключившая возможность пиратского использования канала связи.

Основные характеристики стандартов NMT-450 и NMT-900 сохранились. Появление первой сети аналогового стандарта AMPS (Advanced Mobile Phone System) можно считать «родоначальницей» всех современных сотовых систем, поскольку технологии мобильной связи NMT следует, скорее, относить к транковому, нежели к сотовому типу. Основным мотивом разбиения территории на ячейки (cells) послужило стремление эффективно использовать радиоволновой ресурс – ведь достаточно удалённые друг от друга соты могут работать на одних и тех же частотах. AMPS является распространённым стандартом в США и Канаде, кроме того, сети, построенные по этой технологии, можно найти на Ближнем Востоке и в Европе. Аналоговый стандарт AMPS также использует метод FDMA. При разработке стандарта на каждой географической территории

предполагалось присутствие двух провайдеров – так называемого wireline (проводного) оператора (обычно им становилась компания, которая занималась проводной телефонной связью на данной территории) и non-wireline-оператора (им могла стать любая компания или группа инвесторов, удовлетворяющая требованиям FCC – Федеральной Комиссии по Телекоммуникациям). Частотный ресурс делился между двумя компаниями поровну, диапазон non-wireline-оператора получил название А-диапазона, а wireline – В-диапазона. А-диапазон включал частоты 824...834 МГц и 845,0...846,5 МГц на передачу и 869...880 МГц и 890,0...891,5 МГц на приём. В В-диапазоне передача осуществляется на 835...845 МГц и 846,5...849,0 МГц, а приём – на 880...890 МГц и 891,5...894 МГц. Каждый диапазон состоит из 21 канала управления и 312 каналов передачи речи, при ширине канала – 30 КГц. Общее же количество каналов составляет 666 (624 голосовых и 42 управляющих). Уже после ввода сетей AMPS в эксплуатацию Федеральная Комиссия по Телекоммуникациям выделила 156 дополнительных частотных каналов, доведя таким образом, общее число каналов до 832.

Основным недостатком аналоговых сотовых сетей является то, что системы не выдерживают активного роста абонентской базы, так как число одновременно говорящих пользователей в аналоговой системе по современным меркам мало – ведь при разговоре абонент занимает канал целиком. Очевидным шагом вперёд стало построение систем на основе комбинации FDMA с TDMA (не только частотное, но и временное разделение каналов), одним из самых ярких примеров которых являются сети GSM. Частично задача увеличения числа абонентов в уже существующих сетях AMPS была решена с помощью технологии, предложенной компанией “Motorola” и получившей название NAMPS (Narrow-band AMPS – узкополосный AMPS). В результате каждый канал был разбит на три (шириной по 10 КГц), а их общее число, таким образом, выросло до 2412. Также добавилась возможность обмена сообщениями. Учитывая недостатки, ограничивающие развитие аналоговых стандартов, был разработан цифровой улучшенный стандарт D-AMPS.

1.2. ВТОРОЕ ПОКОЛЕНИЕ. ЦИФРОВЫЕ СОТОВЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Системы второго поколения, спустя десятилетие, представляют сотовые системы, и в отличие от предшествующих, использовали цифроаналоговое преобразование речи. Эти системы образовали сеть цифровых систем, таких как:

- GSM (Global System for Mobile communications) – глобальной системы мобильных коммуникаций;
- IS-54, IS-95 – цифровые сотовые системы;
- PDC – персональная цифровая сотовая система.

Стандарт на цифровую сотовую систему связи был разработан в 1990 г., и система связи на его основе получила условное обозначение D-AMPS (Digital Advanced Mobile Phone Service) или ADC. В 1991–1992 годах проводились полевые испытания системы D-AMPS, по результатам которых Ассоциация про-

мышленности сотовой связи (СТИА) совместно с Ассоциацией промышленности связи (ТИА) приняла три стандарта:

- 1) IS-54 – на систему сотовой связи D-AMPS (ADC);
- 2) IS-55 – на двухмодовую подвижную станцию, обеспечивающую связь как по аналоговому (AMPS), так и по цифровому (D-AMPS) каналам связи;
- 3) IS-56 – на базовые станции. Внедрение этих стандартов явилось временным шагом для того, чтобы как можно быстрее внедрить цифровую технологию на рынок сотовой связи США. Ожидалось, что стандарт IS-54 позволит увеличить ёмкость трафика существующих сетей сотовой связи AMPS до трёх раз, но с использованием аналоговых каналов управления.

Цифровой стандарт D-AMPS использует всё тот же рабочий диапазон частот – 825...890 МГц, характеризуется заметно большей ёмкостью сети, чем у NMT-450 и AMPS, имеет достаточно большой набор сервисных функций и сравнительно низкую излучаемую мощность телефонного аппарата, равную, максимум, 0,6 Вт, что уменьшает расход батареи.

В 1994 году был сформулирован новый стандарт IS-136 с переходом на полностью цифровую систему сотовой связи, представляющую собой усовершенствованный вариант стандарта IS-54. Стандарт IS-136 по своим функциональным возможностям и предоставляемым услугам приближается к стандарту GSM. Он открывает возможность внедрения международного роуминга. GSM-900. В 1982 году СЕРТ (Conference of European Posts and Telegraphs) в целях изучения и разработки общеевропейской системы сотовой подвижной связи общего пользования создала рабочую группу, получившую название GSM (Group Special Mobile). Разрабатываемая система должна была удовлетворять следующим критериям:

- высокое качество передачи речевой информации;
- низкая стоимость оборудования и предоставляемых услуг;
- возможность поддержки портативного оборудования пользователя;
- поддержка ряда новых услуг и оборудования;
- спектральная эффективность;
- совместимость с ISDN;
- поддержка международного роуминга, т.е. возможности использования абонентом своего мобильного телефона при перемещении в другую сеть GSM [21].

Переход на технику второго поколения позволил использовать ряд новых решений:

- модели повторного использования частот;
- временное разделение каналов между собой;
- разнесение во времени процессов передачи и приёма при дуплексной связи;
- эффективные методы борьбы с замираниями и искажениями сигналов;
- эффективные низкоскоростные речевые кодеки с шифрованием передаваемых сообщений для ведения кодированной передачи;
- более эффективные методы модуляции;

– интеграция услуг телефонной связи с передачей данных – другие услуги подвижной связи, включая стандарт GSM.

Но главная особенность цифровой техники – программное управление многими процессами:

- формирование логических каналов;
- переключение подвижного абонента между сотами;
- организацию современных протоколов связи на основе эталонной модели взаимосвязи открытых систем (MOSC – Open System Communication Model) международной организации по стандартизации (ISO – International Standards Organization);
- управление с помощью интеллектуальной сети.

Эти преимущества определили дальнейшее развитие сотовых систем в 1990-х годах на основе цифровой техники.

Кроме европейского стандарта GSM, существует ещё несколько стандартов цифровых систем связи:

- американский ADS (American Digital System);
- традиционно использующийся в США PCS (Personal Communications Service);
- английский DCS-1800 (Digital Cellular System), являющийся прямым аналогом GSM-1800;
- японский JDS (Japan Digital System).

2. ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ СОТОВЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА GSM

Стандарт GSM (Global System for Mobile Communication) является результатом основополагающих исследований ведущих исследовательских и инженерно-технических регионов Европы. Разработанные и усовершенствованные впоследствии в GSM структурные, концептуальные и конструкторско-технологические решения служат примером аналоговых решений в структуре всей цифровой системы подвижных объектов связи. GSM-система должна была удовлетворять следующим критериям:

- высокое качество передачи речевой информации;
- низкая стоимость оборудования и предоставляемых услуг;
- возможность поддержки портативного оборудования пользователя;
- поддержка ряда новых услуг и оборудования;
- спектральная эффективность;
- совместимость с ISDN;
- поддержка международного роуминга.

В соответствии с определениями ITU-T сеть GSM может предоставлять следующие типы услуг:

- услуги по передаче информации (Bearer Services – основные службы);
- услуги предоставления связи (Teleservices – телеслужбы);
- дополнительные услуги (Supplementary Services).

Основные службы – это, по существу, организация синхронных и асинхронных каналов передачи данных на скоростях от 300 до 14 000 бит/с. При передаче данных со скоростью 9,6 и 14,4 кбит/с (с отключённым помехоустойчивым кодированием) всегда используется канал связи с полной скоростью передачи. В случае передачи на скоростях ниже 9,6 кбит/с, могут использоваться полускоростные каналы связи. Предусматривается дальнейшее повышение скорости передачи данных за счёт объединения нескольких каналов трафика. Абоненты GSM могут осуществлять обмен информацией с абонентами ISDN, обычных телефонных сетей, сетей с коммутацией пакетов и сетей связи с коммутацией каналов, используя различные методы и протоколы доступа, например, IP или X.25 [1].

Основным телесервисом GSM является телефония, т.е. передача речи, включая тональную сигнализацию в полосе частот. Так как GSM является цифровой системой передачи данных, речь кодируется и передаётся в виде цифрового потока. Возможна передача факсимильных сообщений, реализуемых при использовании соответствующего адаптера для факсимильного аппарата. В качестве дополнительных функций стандартизован широкий спектр особых услуг (передача вызова, оповещение о тарифных расходах, включение в закрытую группу пользователей). Особое внимание уделяется аспектам безопасности и качеству предоставляемых услуг. К дополнительной услуге передачи данных относится и новый вид служб, используемый в GSM – служба передачи корот-

ких сообщений (SMS – Short Message Service). К ней относится и служебная информация для отдельных групп пользователей.

При передаче коротких сообщений используется пропускная способность каналов передачи данных между подвижной станцией и центром ОМС, т.е. каналов управления. Для передачи коротких сообщений могут использоваться общие каналы управления. Сообщения объёмом 160 символов (70 при использовании кириллицы) могут передаваться и приниматься подвижной станцией в течение текущего вызова либо в нерабочем цикле. В пределах соты короткие сообщения передаются циклически и несут информацию, например, о дорожном движении, рекламу и т.п.

Основная часть дополнительных сервисов не является специфичной для сотовой сети и в значительной степени аналогична услугам сетей ISDN (например, перенаправление вызова в случае недоступности подвижного абонента, идентификация вызова, постановка вызова в очередь, переговоры сразу нескольких абонентов и др.). Однако в связи с тем, что сеть ISDN так и не стала массовой глобальной ТКС, а GSM фактически таковой уже является в глазах сотен миллионов подвижных абонентов, то именно GSM является в настоящее время «распространителем» многих удобных дополнительных услуг, отлично сочетающихся с особенностями мобильной связи. В части дополнительных услуг сети GSM намного превосходят обычные ТФОП. Неслучайно, в последнее время, несмотря на ещё относительно высокую стоимость подвижной связи, спрос на мобильные телефоны даже для домашнего применения заметно превышает спрос на обычные проводные телефоны. И, главное, этот спрос оперативно удовлетворяется без многолетних ожиданий в очереди на установку телефона. На рисунке 2.1 представлена типовая структура и состав сети GSM.

Центр коммутации подвижной связи MSC обслуживает группу сот и обеспечивает все виды соединений между подвижными и стационарными пользователями. MSC аналогичен коммутационной станции ISDN, но включает дополнительный интерфейс между фиксированными сетями (PSTN, PDN, ISDN и т.д.) и сетью подвижной радиосвязи. Он обеспечивает: маршрутизацию вызовов и функции управления вызовами (функция обычной ISDN коммутационной станции); функции коммутации радиоканалов, к которым относятся «эстафетная передача» для достижения непрерывности связи при перемещении подвижной станции из соты в соту и переключение рабочих каналов в соте при появлении помех или неисправностях; постоянное «слежение» за подвижными станциями, используя регистры положения (HLR) и перемещения (VLR) (домашний и гостевой локальные регистры).

В составе подсистемы коммутации (SSS) обычно вместе с MSC (со стороны BSS) находится транскодер (TCE), который обеспечивает прямое и обратное преобразование ОЦК 64 кбит/с в сжатый речевой сигнал 13 кбит/с, передаваемый по радиоканалу.

В домашнем локальном регистре (HLR) хранится информация о местоположении какой-либо подвижной станции, которая позволяет центру коммутации оставить вызов. Домашний локальный регистр (HLR) содержит международный идентификационный номер подвижного абонента (IMSI). Он используется для опознавания подвижной станции в центре аутентификации (AUC).

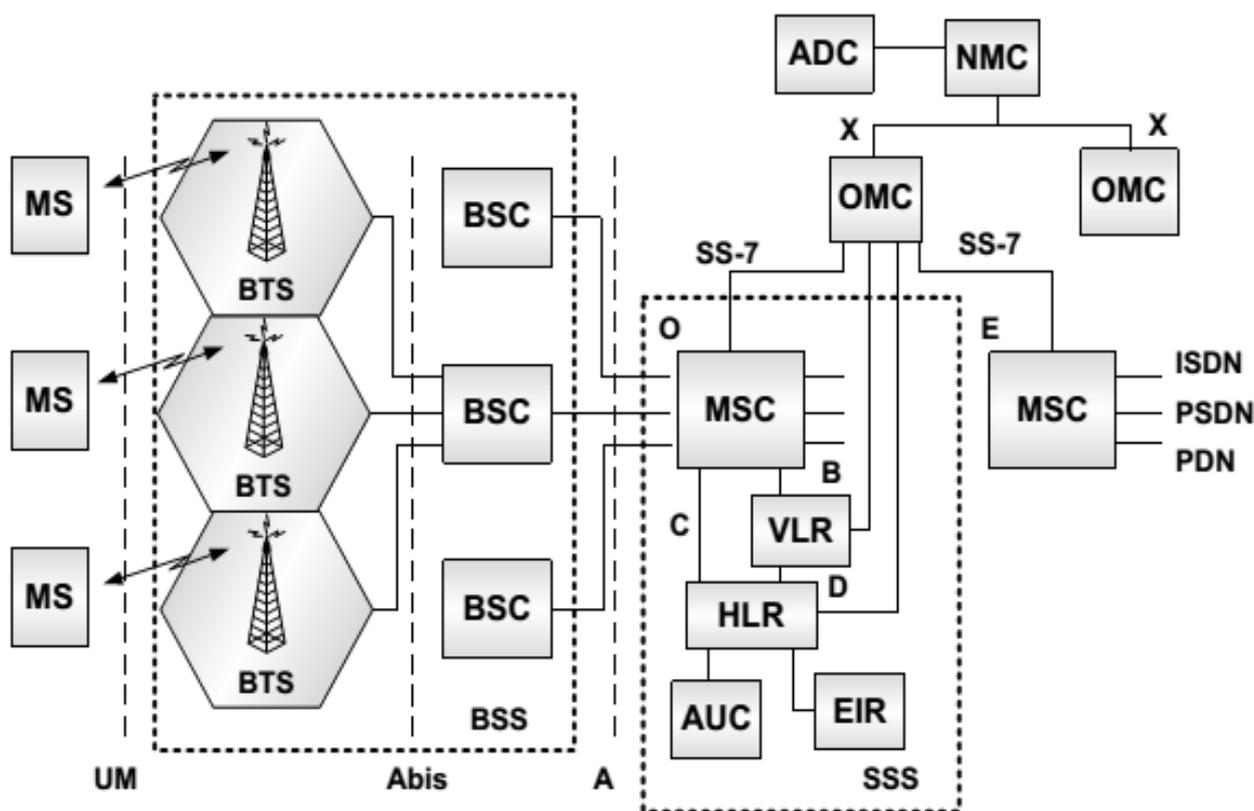


Рис. 2.1. Типовая структура и состав сети GSM:

MS (Mobile Station) – мобильная связь; BTS (Base Transceiver Station) – базовая станция; BSC (Base Station Controller) – контроллер базовой станции; SS (Base Station Subsystem) – оборудование базовой станции; MSC (Mobile Switching Center) – центр коммутации подвижной сети; VLR (Visitor Location Register) – регистр перемещения; LR (Home Location Register) – домашний локальный регистр; UC (Authentication Center) – центр аутентификации; EIR (Equipment Identification Register) – регистр идентификации оборудования; SSS (Switching Station Subsystem) – подсистема коммутации; DC (Advanced Direct Connect) – административный центр; NMS (Network Management System) – центр управления сетью; OMC (Operations and Maintenance Center) – центр управления и обслуживания; ISDN (Integrated Services Digital Network) – цифровая сеть с интеграцией служб; PSTN (Public Switched Telephone Network) – телефонная сеть общего пользования; PDN (Public Data Network) – сеть передачи данных общего пользования

Второе основное устройство, обеспечивающее контроль за передвижением подвижной станции из зоны в зону, – регистр перемещения (VLR). С его помощью достигается функционирование подвижной станции за пределами зоны, контролируемой домашним локальным регистром (HLR). Когда в процессе перемещения подвижная станция переходит из зоны действия одного контроллера базовой станции (BSC), объединяющего группу базовых станций, в зону действия другого, она регистрируется новым контроллером базовой станции (BSC), и в регистр перемещения заносится информация о номере области связи, которая обеспечит доставку вызовов подвижной станции. Для сохранности данных, находящихся в домашнем локальном регистре (HLR) и регистре перемещения (VLR), в случае сбоя предусмотрена защита устройств памяти этих регистров. [21]. Для исключения несанкционированного использования ресурсов системы связи вводятся механизмы аутентификации – удостоверения подлинности аобо-

нента. Центр аутентификации состоит из нескольких блоков и формирует ключи и алгоритмы аутентификации. С его помощью проверяются полномочия абонента и осуществляется его доступ к сети связи. Центр аутентификации (AUC) принимает решения о параметрах процесса аутентификации и определяет ключи шифрования абонентских станций на основе базы данных, сосредоточенной в регистре идентификации оборудования (EIR). Каждой подвижной станции присваивается свой международный идентификационный номер (IMEI). Этот номер используется для предотвращения доступа к сетям GSM «похищенной» станции или станции без прав доступа.

Каждый подвижный абонент на время пользования системой связи получает стандартный модуль подлинности абонента (SIM), который содержит: международный идентификационный номер (IMSI), свой индивидуальный ключ аутентификации, алгоритм аутентификации. С помощью заложенной в SIM информации, в результате взаимного обмена данными между подвижной станцией и сетью, осуществляется полный цикл аутентификации и разрешается доступ абонента к сети [1 – 4, 21].

Основное оборудование базовой станции состоит из контроллера базовой станции (BSC) и приёмопередающих базовых станций (BTS). Контроллер базовой станции может управлять несколькими приёмопередающими блоками. Оборудование базовой станции (BSS) управляет распределением радиоканалов, контролирует соединения, регулирует их очерёдность, обеспечивает режим работы с прыгающей частотой, модуляцию и демодуляцию сигналов, кодирование и декодирование сообщений, кодирование речи, адаптацию скорости передачи для речи, данных и вызова, а также определяет очерёдность передачи сообщений персонального вызова.

Оборудование базовой станции совместно с центром коммутации подвижной радио связи (MSC), домашним локальным регистром, регистром перемещения выполняет ряд функций: освобождение канала, главным образом под контролем центра коммутации подвижной радиосвязи, но при этом MSC может запросить базовую станцию, обеспечить освобождение канала, если вызов не приходит из-за радиопомех [5, 6, 21].

Оборудование базовой станции (BSS) и центр коммутации подвижной радиосвязи (MSC) совместно осуществляют приоритетную передачу информации для некоторых категорий подвижных станций. Центр управления и обслуживания (OMC) обеспечивает распределение функций и организацию взаимодействия между оборудованием базовой станции (BSS) и центром коммутации подвижной радиосвязи (MSC). Его функции совпадают с функциями OMC в обычных сетях связи. Отличие заключается в том, что в сетях стандарта GSM центр OMC обслуживает управление работой радиоподсистемы. Функциональное сопряжение элементов сети GSM осуществляется через стандартные интерфейсы, ряд из которых напоминает по своим однобуквенным обозначениям контрольные стыки ISDN.

В стандарте GSM предусмотрены интерфейсы трёх видов:

- 1) для соединения с внешними сетями;

2) между различным оборудованием сетей GSM (интерфейсы А, В, С, D, E, O, Abis, Um);

3) между сетью GSM и внешним оборудованием GSM (интерфейсы SC, X).

Стандарт GSM предусматривает работу передатчиков МС в диапазоне частот 890...915 МГц, а передатчиков БС в диапазоне 935...960 МГц. Таким образом, между диапазонами приёма и передачи предусмотрен постоянный разнос 45 МГц. Каждый из указанных поддиапазонов разбит на 124 частотных канала с шагом 200 кГц.

В стандарте GSM используется узкополосный многостанционный доступ с временным разделением каналов (TDMA). В структуре TDMA-кадра содержится 8 временных позиций (слотов) для передачи физических (информационных) каналов. С учётом наличия 124 несущих общая канальная ёмкость стандарта равна 992 каналам. Передача и приём в МС ведутся со сдвигом на три слота, что соответствует реализации временного дуплекса (TDD) в дополнение к указанному выше частотному дуплексу (FDD). Для защиты от ошибок в радиоканалах при передаче информационных сообщений применяется блочное и сверточное кодирование с перемежением. Для борьбы с явлением многолучевости распространения радиоволн в условиях города в процессе сеанса связи применяются медленная программная перестройка рабочих частот (SFH) со скоростью 217 скачков в секунду, а также эквалайзеры, обеспечивающие выравнивание импульсных сигналов со среднеквадратическим отклонением времени задержки до 16 мкс [1, 6].

Система синхронизации обеспечивает компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс, что соответствует максимальной дальности связи (радиусу ячейки) 35 км. 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/LTP-LPC-кодек). Кодируемые сегменты речи имеют длительность 20 мс. Общая скорость преобразования речевого сигнала – 13 кбит/с. В стандарте GSM обеспечивается высокая степень безопасности передачи сообщений за счёт кодирования сообщений по алгоритму шифрования с открытым ключом (RSA) [1, 7 – 9, 21].

К настоящему времени система GSM развилась в глобальный стандарт второго поколения, занимающий лидирующие позиции в мире как по площади покрытия, так и по числу абонентов.

В 1989 году дело создания GSM перешло к ETSI (European Telecommunication Standards Institute):

- в 1990 году были опубликованы спецификации первой фазы GSM;
- к середине 1991 года стали поддерживаться коммерческие услуги GSM;
- к 1993 году функционировало уже 36 сетей GSM в 22 странах, и ещё 25 стран выбрали направление GSM или поставили вопрос о его принятии.

Несмотря на то, что система GSM была стандартизована в Европе, на самом деле, она не является исключительно европейским стандартом;

- сети GSM внедрены, либо планируются к внедрению почти в 60 странах Европы, Ближнего и Дальнего Востока, Африки, Южной Америки и в Австралии;

- в начале 1994 года число абонентов GSM во всем мире достигло 1,3 млн человек;

- к началу 1995 года их насчитывалось уже более 5 млн.

Стандарт GSM-900 предусматривает работу передатчиков в двух диапазонах частот. Полоса частот используется для передачи сообщений:

- с подвижной станции на базовую 890...915 МГц;

- с базовой станции абоненту 935...960 МГц.

Метод доступа в GSM – это комбинация методов множественного доступа TDMA и FDMA.

Сначала полоса частот в 25 МГц делится на полосы в 200 кГц. Каждой станции соответствует своя полоса (или несколько полос). Абоненты полосы разделены во времени. Каждому абоненту соответствует один кадр. Восемь кадров объединяются во фрейм. 26 фреймов, в свою очередь, образуют мультифрейм, который повторяется циклически. Длина мультифрейма – 120 мс. На один кадр приходится 1/200 мультифрейма, т.е. около 0,6 мс. Каналы определяются числом и позицией соответствующих им циклических кадров, и вся палитра повторяется приблизительно каждые 3 ч. Они делятся на предписанные каналы (Dedicated Channels), или каналы трафика, каждый из которых соответствует одной подвижной станции, и общие каналы (Common Channels), или каналы управления, используемые подвижными станциями в пассивном режиме. В качестве речепреобразующего устройства используется речевой кодек с регулярным импульсным возбуждением и скоростью преобразования речи 13 Кбит/с. Для защиты от ошибок, возникающих в радиоканалах, применяется блочное и сверточное кодирование с перемежением, реализуемое с помощью EFR, технологии, разработанной компанией Nokia. Повышение эффективности кодирования и перемежения при малой скорости перемещения подвижных частот достигается медленным переключением рабочих частот в процессе сеанса связи (со скоростью 217 скачков в минуту). Область, покрываемая сетью GSM, разбита на соты шестиугольной формы. Диаметр каждой шестиугольной ячейки может быть разным – от 400 м до 50 км. Функции и интерфейсы элементов сети GSM описаны в рекомендациях ETSI.

3. ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Образование и развитие универсальных мобильных систем связи (УМСС) осуществляется по двум направлениям. Первое (эволюционное) – совершенствование существующих стандартов сетей подвижной радиосвязи путём внедрения новых видов услуг. Второе (революционное) – создание новых стандартов СПР, обеспечивающих все современные услуги и возможность введения новых. На западе эти подходы получили обозначение N (Narrowband) и W (Wideband) стратегии (рис. 3.1).

Основным движущим мотивом создания единого международного стандарта на мобильную систему связи, охватывающую беспроводный доступ, наземную сотовую и спутниковую связь, является обеспечение глобального покрытия земного шара с предоставлением услуг массовому потребителю, вне зависимости от его местоположения, типа сети и используемого терминала (наземный или спутниковый).

Идея создания единого международного стандарта заключается в предоставлении услуг с помощью недорогого портативного терминала с высокими эксплуатационными характеристиками (энергопотреблением, качеством связи, уровнем безопасности).

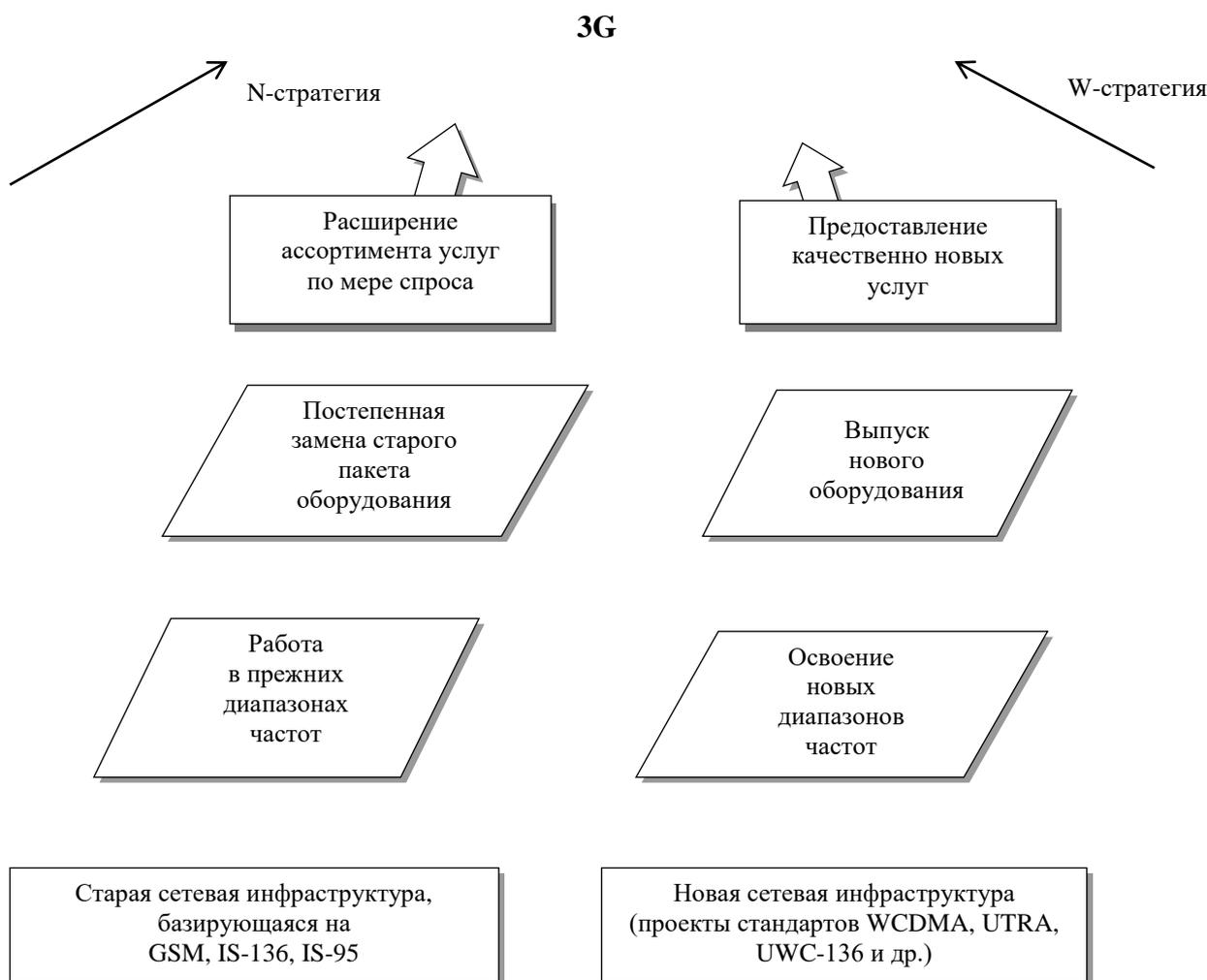


Рис. 3.1. Две стратегии перехода к системам третьего поколения

С системных позиций единый стандарт означает гибкий радиointерфейс с однотипной сигнализацией и расширенным набором услуг, варьируемых в зависимости от требований пользователя и сценариев организации связи [3, 11]. К ключевым требованиям, предъявляемым ИТУ к единому стандарту, относятся: высокая степень преемственности оборудования наземных и спутниковых систем в пределах всего земного шара, возможность конвергенции услуг типа «мобильный–мобильный» (для разных мобильных сетей) и «мобильный–стационарный» (при связи с абонентами ТФОП), а также обеспечение услуг мультимедиа в рамках глобальной информационной инфраструктуры. Терминалы третьего поколения должны обеспечивать высокое качество передачи речи, небольшие размеры и возможность передачи асимметричных потоков данных в линии «вверх» и «вниз».

Первая концепция единого стандарта называлась «Перспективная сухопутная мобильная телекоммуникационная система общего пользования» или кратко – FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications Systems). По мере разработки требований к системам нового поколения стало ясно, что одной наземной (сухопутной) связью (без спутниковой) третье поколение обойтись не сможет. Начиная с 1996 г., изменение взглядов ИТУ на концепцию развития мобильной связи нашло отражение в её названии: ИМТ-2000 (International Mobile Telecommunications). Число 2000 в новом названии весьма символично: во-первых, это диапазон частот (в МГц), в котором будет работать новая система, во-вторых, это предполагаемый год начала внедрения системы, в-третьих, это максимальная доступная каждому абоненту информационная скорость (2048 кбит/с). К 2000 году ни один из пунктов не был выполнен. Но было выдвинуто много технических предложений, многие из которых отсеялись, и остались две основные технологии. Первая из них называется WCDMA – широкополосный CDMA (Wideband CDMA), была предложена фирмой Ericsson, поддержана Европейским союзом, который назвал её UMTS (Universal Mobile Telecommunications Systems – универсальная система мобильной связи). Вторым претендентом стала система CDMA-2000, предложенная Qualcomm. У этих систем большее сходств, чем различий. Базовый принцип обеих систем – DMA. WCDMA используют полосу пропускания 5 МГц, а WCDMA-2000 – 1,25 МГц.

С организационной точки зрения, ИМТ-2000 объединяет две предшествующие программы ИТУ: FPLMTS и GMPCS, которые в дальнейшем получили обозначение T-ИМТ-2000 и S-ИМТ-2000 (T – Terrestrial, S – Satellite). Структура ИМТ-2000 должна была эволюционировать от фиксированных и подвижных сетей связи в направлении к идеальной глобальной системе связи, доступной потребителям, независимо от того, где они находятся – дома, в автомобиле, поезде, на корабле, самолёте (в метро) и т.п. Потребители ИМТ-2000, свободно передвигаясь, смогут выходить в любую из наземных или подвижных спутниковых систем, причём вхождение в подвижные спутниковые системы автоматическое, когда потребитель будет выходить за пределы зон обслуживания наземных систем.

Наиболее перспективной иерархической структурой сети персональной связи является зонтичная, которая предполагает вложенность сот различного размера и управляемый перевод абонента из одной соты в другую, в зависимо-

сти от условий функционирования сети. При слабо развитой инфраструктуре предполагается использование маловысотных летательных аппаратов с ретрансляторами на борту, позволяющих существенно расширить зону обслуживания отдельных БС и снизить время развёртывания системы связи. Другие технические решения, в частности иерархическая сотовая структура, адаптивная антенная решётка и когерентная демодуляция также позволяют наращивать ёмкость сети. Двух-, трёхуровневая (и более) архитектура сети может быть реализована в парных полосах $2 \times 5 \dots 2 \times 20$ МГц, где каждый из уровней занимает 2×5 МГц [7, 8, 14].

При высокоплотной инфраструктуре сети с большим числом базовых станций, обслуживающих малые зоны в пределах ограниченной территории, подвижные абоненты могут полностью использовать ресурс одной базовой станции для реализации высокоскоростного обмена, в это время остальные пользователи могут обслуживаться соседней базовой станцией или в следующей по иерархии соте. Одним из перспективных и уже внедряемых направлений развития мобильной связи является интеграция сотовой связи с автономной (наземной) или глобальной (спутниковой) системой навигации, такой как GPS. В процессе перехода от этапа разработки концепции к конкретным проектам стало очевидным, что интересы различных международных и региональных организаций невозможно объединить в рамках единого стандарта. В связи с этим была выдвинута идея создания семейства систем третьего поколения IFS (IMT-2000 Family of Systems). Провозгласив концепцию семейств IFS, МСЭ активизировал свои усилия на детализации рамочной структуры (ограничений) стандартов третьего поколения.

Рамочная структура IMT-2000 содержит следующие базовые компоненты:

- эталонную модель протоколов и межсетевых взаимодействий (по типу ЭМВОС и стека протоколов TCP/IP);
- частотный ресурс, выделенный на конференции WARC-92 и уточнённый на WARC-2000;
- рекомендации ITU по совместному функционированию различных радиointерфейсов и их эволюции с учётом требований IMT-2000;
- рекомендации по принципам регулирования, обеспечивающим свободное перемещение мобильных терминалов в глобальном масштабе;
- рекомендации по взаимодействию наземных и спутниковых сетей в рамках программы IMT-2000 [21].

Соотношение характеристик технологий мобильной связи разных поколений представлены на рис. 3.2 и в табл. 3.1.

В процессе разработки радиointерфейсов, в который были вовлечены все желающие страны и крупные компании, выделились три основные тенденции:

- 1) сохранить упор на TDMA-стандарты;
- 2) взять за основу существующий стандарт CDMA (IS-95);
- 3) разработать новый WCDMA-стандарт.

В начале 1990-х гг. на волне успехов европейской экономической интеграции и успешной реализации в короткие сроки международного проекта GSM возникла идея создания UMTS (Universal Mobile Telecommunication System): универсальной мобильной телекоммуникационной системы (УМТС).

3.1. Характеристики развития систем связи

Поколение	2G	2.5G	3G	4G	5G
Базовые услуги	Речь	Речь, данные	Речь, данные, видеоданные, мультимедиа	Речь, данные, видеоданные, мультимедиа, мобильное телерадиовещание	Речь, данные, видеоданные, мультимедиа, мобильное телерадиовещание
Скорость передачи кбит/с	9,6...14,4	115 (фаза 1) 384 (фаза 2)	2048 (фаза 1) 10 000 (фаза 2)	1000...44 000	1 000 000... 10 000 000
Тип коммутации	Коммутация каналов	Смешанная (преимущественно каналов)	Смешанная (преимущественно каналов)	?	?
Базовые технологии радиодоступа	GSM, IS136, PDC, CDMA one	GPRS, EDGE, IS136+	IMT-2000	?	?

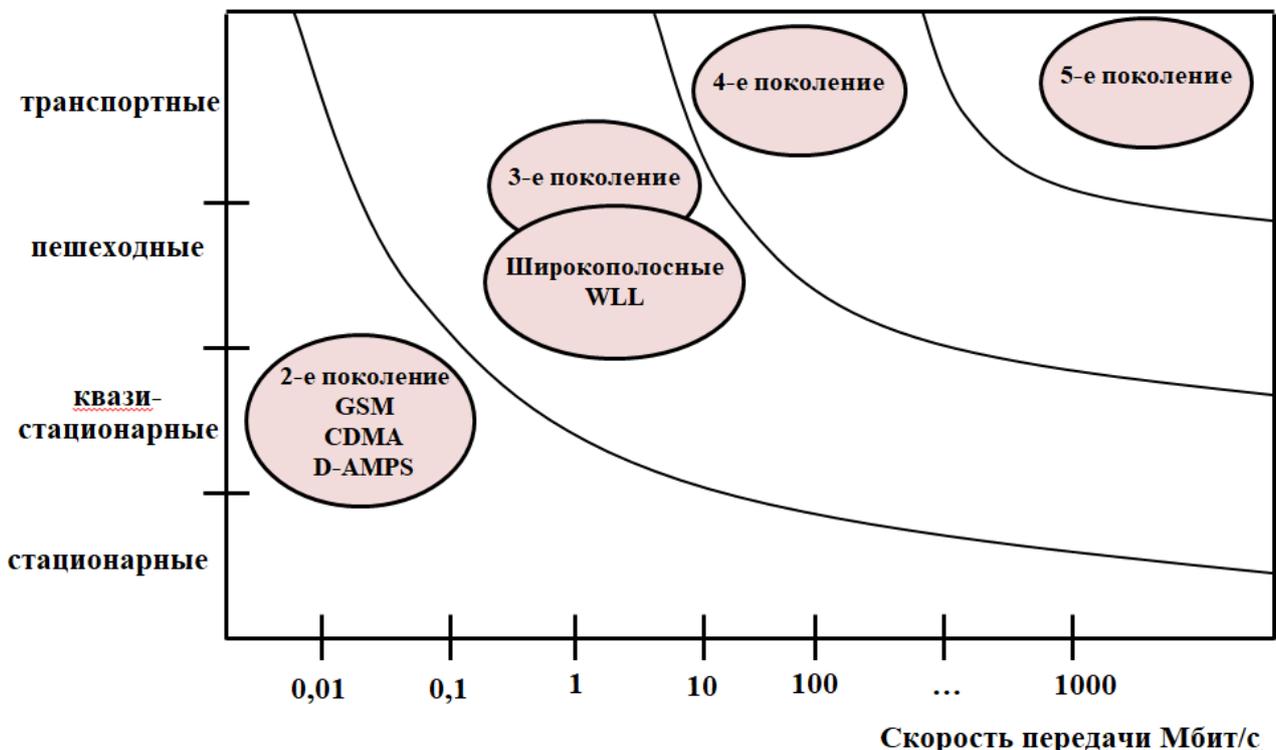


Рис. 3.2. Развитие сотовой связи

Концепции UMTS и IMT-2000 во многих чертах сходны, однако с точки зрения реализации, UMTS имеет ряд преимуществ. UMTS разработана с участием крупных производителей оборудования (Nokia, Ericsson, Alcatel, Siemens,

Italtel) как глобальная система, включающая как наземные, так и спутниковые сети. При этом UMTS позволяет организовать полное взаимодействие с системами GSM и её модификациями (GPRS, EDGE и др.), чтобы не потерять уже вложенные инвестиции. Технология радиодоступа UMTS основана на трёх методах: TDMA, TDMA/CDMA и WCDMA. Последний метод лёг в основу наиболее популярного и перспективного проекта UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access).

Чтобы внедрять новую технологию W-CDMA с меньшими капитальными затратами, ETSI рекомендовалось создавать глобальную инфраструктуру для систем UMTS на базе инфраструктуры существующих сетей GSM [3, 17, 21]. В основу управления UMTS положена современная концепция сетевого управления TMN/TINA. Для реализации данной концепции разрабатываются специальные программно-аппаратные средства, входящие в состав основного оборудования UMTS. Современные протоколы установления соединения в перспективных сетях подвижной радиосвязи позволяют достаточно просто наделить UMTS функциями интеллектуальной сети IN. Согласно концепции IMT-2000, общая архитектура системы нового поколения подразделяется на две составные части (рис. 3.3): сети радиодоступа; базовые сети трёх типов – GSM MAP (Европа), ANSI-41 (США) и универсальные сети с IP-протоколом.

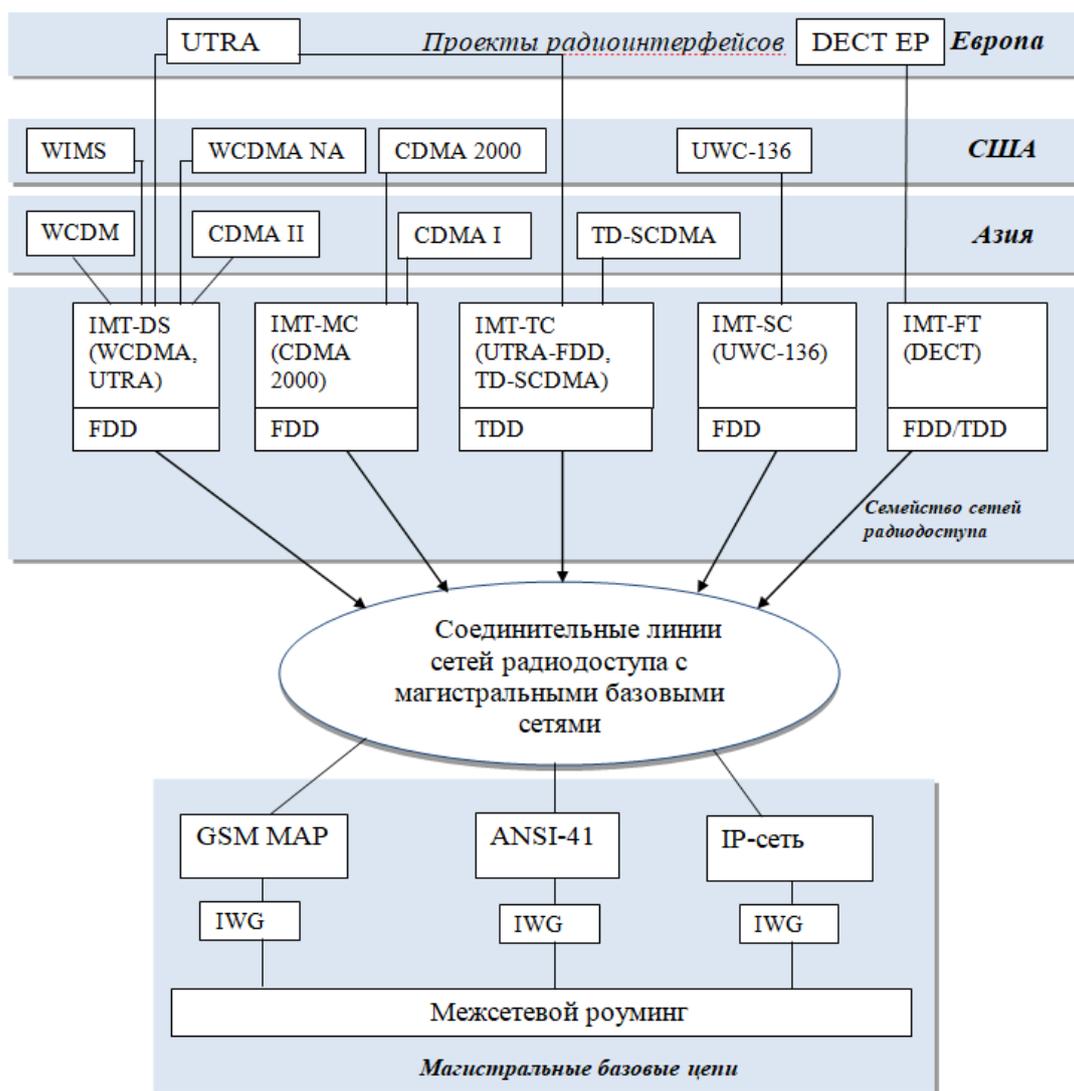


Рис. 3.3. Укрупнённая архитектура наземной сети IMT-2000

Глобальный роуминг между тремя типами базовых сетей будет осуществляться через межсетевой интерфейс NNI. Причём глобальный роуминг в IMT-2000 может быть реализован только в том случае, если радиодоступ будет производиться с использованием многорежимных терминалов, а базовые сети будут содержать конверторы или межсетевые шлюзы.

В Европе практическая реализация технологий WCDMA началась в 1999 г. в рамках программы RACE. В Японии коммерческая эксплуатация первых сетей WCDMA началась в 2001 г. под руководством их будущего оператора – компании NTT DoCoMo. Фирма Ericsson также имеет экспериментальную систему WCDMA, созданную в рамках работ по освоению стандарта IMT-2000. Система позволяет демонстрировать и отрабатывать функциональные возможности служб подвижной связи третьего поколения, соответствующие технические решения и технико-экономические характеристики.

На тот период 10 – 15% абонентов мобильной связи использовали технологию 3G. В Северной Америке и Европе была приблизительно одна треть мобильных абонентов – 3G, в Японии почти все мобильные абоненты пользуются 3G. Однако у них появились мощные конкуренты в нише беспроводных локальных сетей WLAN. По минимальной предлагаемой скорости 10 Мбит/с (пусть и со служебными издержками), технологии WLAN намного превосходят максимальный предел сетей 3-го поколения – 2 Мбит/с. А новые версии технологий WLAN обещали скорости до 100 Мбит/с и более. При той же глобальности и многообразии услуг (на базе сети Интернет) данные технологии беспроводного доступа, не требуя особой инфраструктуры, по стоимости развёртывания (по частям) намного дешевле системы IMT-2000. Правда, пока они уступают даже технологиям 2G в размерах зон покрытия и в мобильности.

4. АРХИТЕКТУРА СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE

Функционально сеть мобильной связи стандарта LTE в соответствии со спецификациями 3GPP состоит из двух частей: сети радиодоступа E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) и открытой пакетной сети поддержки EPC (Evolved Packet Core). E-UTRAN состоит из совокупности базовых станций eNodeB (eNB). Соседние базовые станции соединены между собой интерфейсом X2, а их взаимодействие с EPC осуществляется по интерфейсу S1, как это показано на рис. 4.1.

Кроме того, возможны транзитные связи между базовыми станциями через EPC. На базовые станции в сети стандарта LTE возложено выполнение таких функций, как:

- управление радиоресурсами (распределение радиоканалов и динамическое распределение ресурсов в нисходящем и восходящем направлениях передачи);
- обеспечение гарантированной доставки и целостности информации, передаваемой по радиоканалам;
- сжатие заголовков IP-пакетов и закрытие (шифрование) пользовательской информации;
- выбор блока управления мобильностью (MME) в сети открытой пакетной поддержки;
- маршрутизация пакетов пользовательской информации по направлению к открытой пакетной сети (к S-GW);
- диспетчеризация и передача вызывной и вещательной информации, получаемой от EPC (от MME);
- измерения и составление отчётов, необходимых для управления мобильностью, в том числе принятие решения об инициации процедуры переключения вызова (Handover) и первые этапы её реализации;

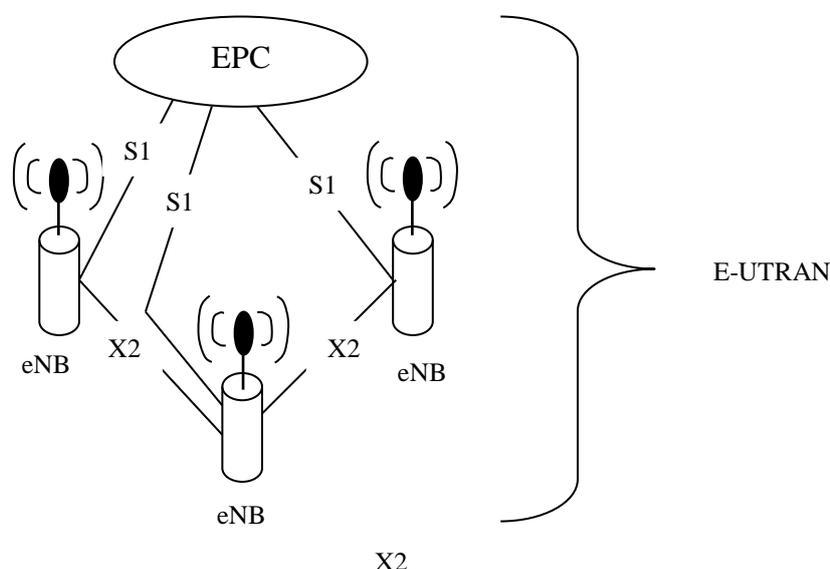


Рис. 4.1. Сеть мобильной связи стандарта LTE

– поддержка многоантенной технологии MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Технология «много входов – много выходов» используется либо для повышения качества доставки информации, либо повышения скорости передачи. Стандарт LTE использует схемы много входов – много выходов, содержащие 1, 2 и 4 передающих и приёмных антенн в различных сочетаниях.

Для повышения качества доставки информации используется диверсифицированный способ передачи (пространственное/временное/частотное кодирование). В этом случае группа символов передаётся либо последовательно во времени на одной несущей (пространственно-временное кодирование, либо одновременно на нескольких поднесущих (пространственно-частотное кодирование) параллельными потоками. На практике широкое применение нашла схема Аламоути пространственно-временного кодирования (STC – Space Time Coding) [3, 18, 21].

Повышение скорости передачи обеспечивается за счёт пространственного мультиплексирования, которое реализуется на основе многослойных структур. Передаваемый информационный поток разделяется на слои (Layers), которые с помощью специальных MIMO кодирующих матриц (Precoding) преобразуются для передачи через отдельные антенны, число которых может достигать четырех, и число антенн базовой станции (eNB) должно соответствовать числу антенн подвижной станции (UE). Число слоев определяет ранг структуры. При этом в LTE используют два варианта пространственного мультиплексирования: однокодовый (SCW – Single Code Word) и многокодовый (MCW – Multiple Code Word) (рис. 4.2). Кроме того, при нисходящем направлении передачи системы MIMO классифицируют как однопользовательские (SU-MIMO – Single-User MIMO) и многопользовательские (MUMIMO – Multi-User MIMO).

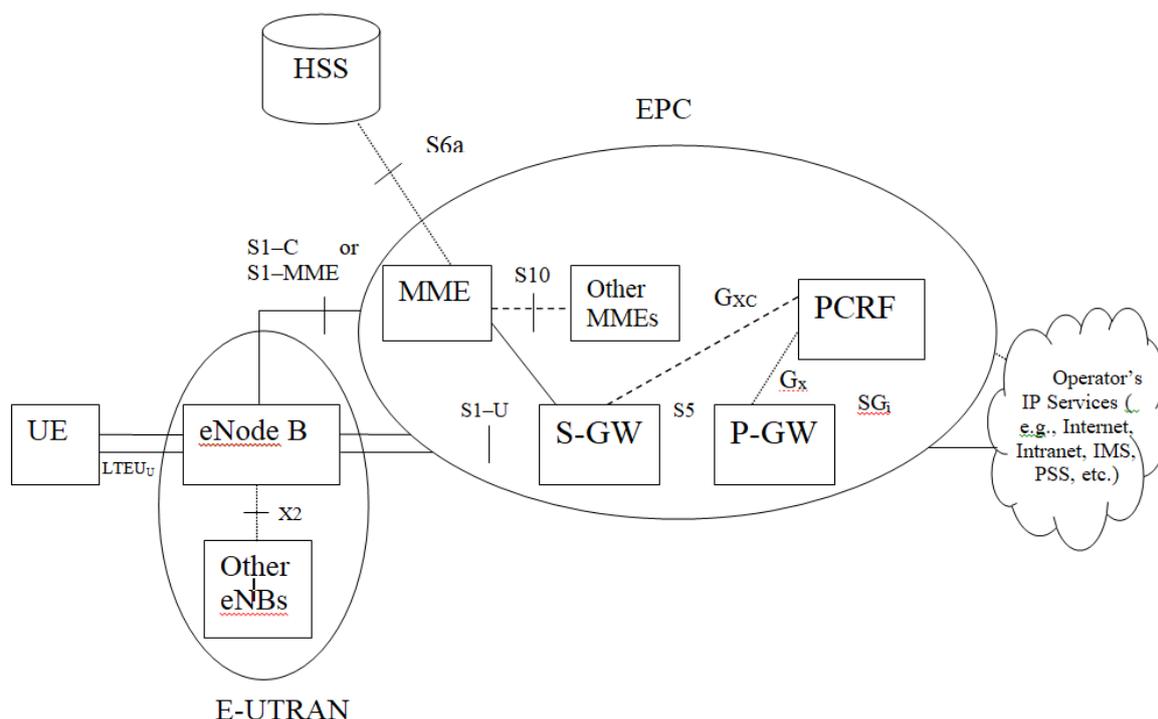


Рис. 4.2. Архитектура сети мобильной связи стандарта LTE

SU-MIMO предназначена для обслуживания только одной подвижной станции (UE). MUMIMO применяют, когда eNB в одном канале передает информацию для нескольких пользователей.

Рассмотрим функциональное назначение компонент EPC.

UE (User Equipment) – оборудование пользователя. Подвижная станция, которая, как и в предыдущих стандартах, состоит непосредственно из самого оборудования и SIM карты. В состоянии LTE_DETACHED UE находится после её включения. В этом состоянии UE не зарегистрирована в сети и не имеет IP-адреса. После выполнения процедуры доступа к сети UE получает регистрацию в сети и IP-адрес и переходит в состояние LTE_ACTIVE. В данном состоянии Подвижная станция связана с конкретным eNB и обмен информацией идёт по UU интерфейсу. Состояние LTE_ACTIVE имеет два варианта: OUT_OF_SYNC и IN_SYNC в зависимости от того, есть или нет синхронизации с eNB для передачи информации в восходящем направлении. В состоянии LTE_IDLE UE переводят на время пауз между сеансами связи. В этом состоянии UE находится в режиме ожидания. В целях экономии питания приёмник включается периодически для приёма сигналов системного управления и пейджинга. Для перехода из состояния LTE_IDLE в состояние LTE_ACTIVE необходимо выполнить процедуру доступа к сети [4].

MME (Mobility Management Entity) – блок управления мобильностью реализует процедуры, необходимые для обеспечения персональной мобильности. На MME возлагаются следующие задачи:

- аутентификация;
- обновление данных местонахождения (Tracking Area Update);
- управление списками зон слежения (Tracking Area);
- авторизация;
- выбор обслуживающего шлюза (S-GW) EPC для сетей радиодоступа различных стандартов;
- выбор нового блока MME для переключения вызова (Handover);
- передача закрытой информации о точках доступа к услугам;
- поддержка передач информации в вещательном режиме.

S-GW (Serving Gateway) – обслуживающий шлюз отвечает за выполнение следующих функций:

- включение LTE_DETACHED LTE_IDLE LTE_ACTIVE OUT_OF_SYNC IN_SYNC [63];
- маршрутизация пакетов данных;
- выбор точки «привязки» при переключении вызова (Handover);
- буферизация пакетов для UE, находящихся в состоянии ожидания (Idle Mode);
- установка показателей качества (QoS) предоставляемых услуг;
- формирование и передача учётных данных для тарификации;
- санкционированный перехват пользовательской информации.

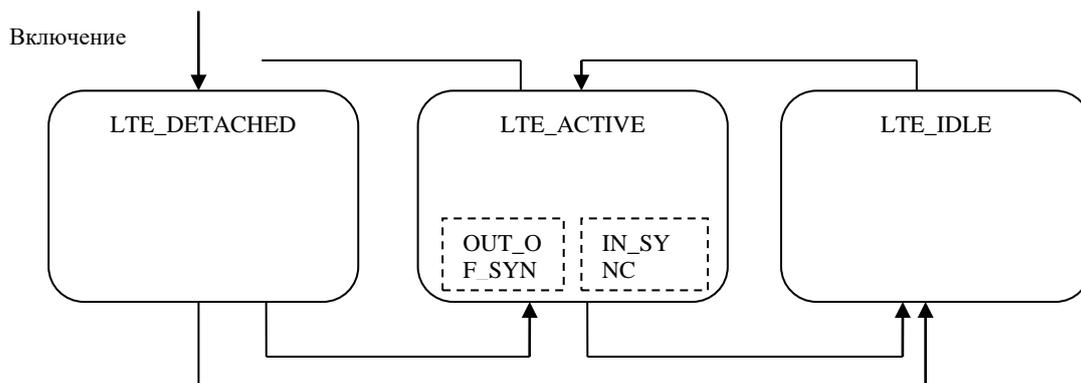


Рис. 4.3. В процессе работы в сети E-UTRAN оборудование пользователя может находиться в одном из трёх возможных состояний

P-GW (Packet Data Network Gateway) – шлюз доступа к внешним IP-сетям (IMS, Internet). P-GW обеспечивает UE IP-адресом. Если UE имеет статический IP-адрес, P-GW осуществляет его активацию. Если же UE не имеет IP-адреса, то необходимо предоставить динамический IP-адрес на время сеанса связи. P-GW запрашивает его у сервера DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), либо сам реализует функции DHCP. Полученный динамический IP-адрес P-GW доставляет UE. В состав P-GW входит функция PCEF (Policy and Charging Enforcement Function), с помощью которой обеспечиваются требуемые характеристики QoS услуг при взаимодействии с внешними IP-сетями [4, 5].

PCRF (Policy and Charging Resource Function) – представляет собой управляющий сервер, обеспечивающий централизованное управление ресурсами EPC, учёт и тарификацию предоставляемых услуг. Как только появляется запрос на реализацию услуги, эта информация направляется в PCRF. Он оценивает имеющиеся в его распоряжении сетевые ресурсы и передаёт команду P-GW (функции PCEF) на установку требуемых характеристик QoS и порядку тарификации.

HSS – Home Subscriber Server: Сервер абонентских данных конкретной сети оператора связи. Как и HLR, сети GSM, HSS содержат абонентские данные о UE только тех абонентов, которые заключили договор на предоставление услуг с данной сетью. Данная компонента не входит в состав EPC, а принадлежит IMS.

4.1. ИНТЕРФЕЙСЫ СЕТИ LTE. ЭТАЛОННАЯ МОДЕЛЬ OSI. СИГНАЛЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

Под интерфейсами понимается совокупность правил взаимодействия компонент сети при обмене информацией в процессе реализации возложенных на них функций. В общем виде правила обмена информацией регламентируются семиуровневой моделью взаимодействия открытых систем (OSI). Основным понятием модели OSI является протокол, как правило, взаимодействия одноимённых уровней двух открытых систем [5, 7].

Эталонная модель OSI расшифровывается как Open Systems Interconnection Model и представляет собой стандартизированную структуру, описывающую коммуникационные функции сетевой системы. Она состоит из семи уров-

ней, и каждый слой имеет определённую функциональность для выполнения. На этапе развития сетевых систем сетевые устройства были ограничены возможностью взаимодействия с устройствами, изготовленными теми же поставщиками. Например, сетевое устройство, изготовленное компанией X, может взаимодействовать только с другими устройствами, изготовленными той же компанией, но не с устройствами других компаний. Чтобы гарантировать, что сетевые устройства, произведённые на национальном и международном уровнях, могут взаимодействовать друг с другом, устройства должны разрабатываться в соответствии со стандартной процедурой. Чтобы обеспечить стандартизацию в вычислительной и коммуникационной системах, Международная организация по стандартизации (ИСО) опубликовала модель OSI в 1984 г., которая состоит из семи уровней: Прикладной уровень, Уровень представления, Сеансовый уровень, Транспортный уровень, Сетевой уровень, Уровень передачи данных, Физический уровень. Каждый из этих уровней играет свою роль, и они работают совместно для передачи данных с одного сетевого устройства на другое (рис. 4.4).

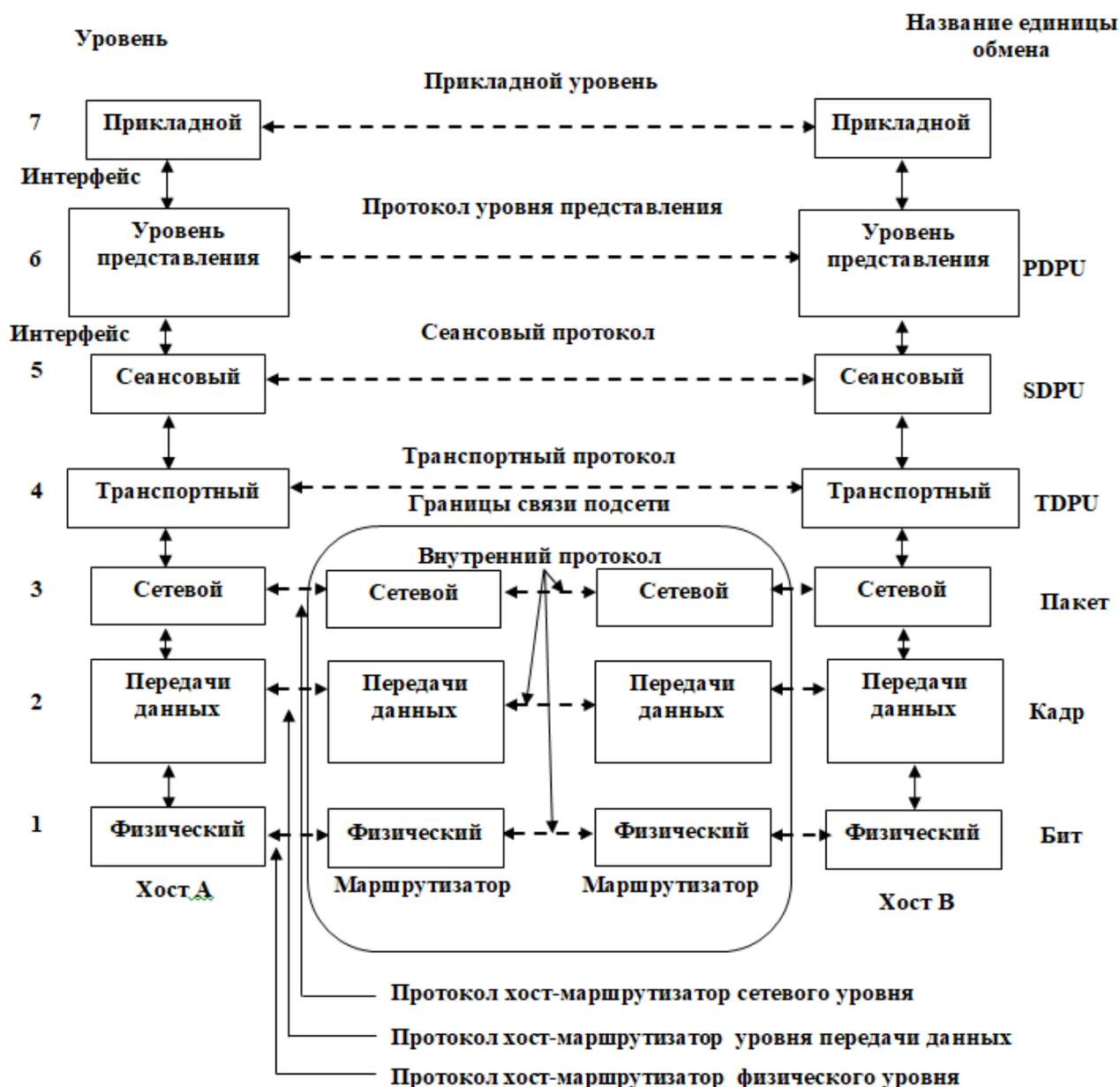


Рис. 4.4. Эталонная модель OSI

Физический уровень – самый низкий уровень в модели OSI, отвечает за передачу и приём необработанных данных между сетевыми устройствами и средой передачи. Он хранит информацию или данные в виде битов и передаёт биты от одного узла к другому (рис. 4.5).

Физический уровень играет жизненно важную роль в управлении скоростью передачи. Всякий раз, когда какое-либо устройство отправляет данные на физический уровень, оно получает данные, преобразует их в биты и отправляет на канальный уровень. При передаче битов он определяет количество битов, передаваемых в секунду. Это облегчает синхронизацию на битовом уровне, устанавливая часы, которые управляют как получателями, так и отправителями. Он определяет режим передачи, в котором данные передаются между двумя сетевыми устройствами. Физический уровень также определяет физическую топологию. Физическая топология – это фактическое расположение компьютерных кабелей и других сетевых устройств. Сетевыми протоколами, которые используются на физическом уровне, являются RS-232, UTP-кабели, DSL.

Канальный уровень – уровень канала передачи данных отвечает за передачу данных между двумя непосредственно подключёнными узлами. Когда физический уровень получает данные, он преобразует их в биты и отправляет на канальный уровень передачи данных. Уровень канала передачи данных гарантирует, что данные или пакет, полученные с физического уровня, не содержат ошибок, а затем передаёт данные с одного узла на другой. Он отправляет пакет на другой узел, используя свой MAC-адрес. Уровень канала передачи данных дополнительно разделён на два подуровня: управление логическим каналом (LLC) и управление доступом к мультимедиа (MAC). Уровень LLC отвечает за проверку ошибок в полученном пакете и синхронизирует кадры. Уровень MAC управляет доступом сетевых устройств к среде передачи. Он также даёт разрешение на передачу данных с одного узла на другой. Как только необработанные данные с физического уровня достигают уровня канала передачи

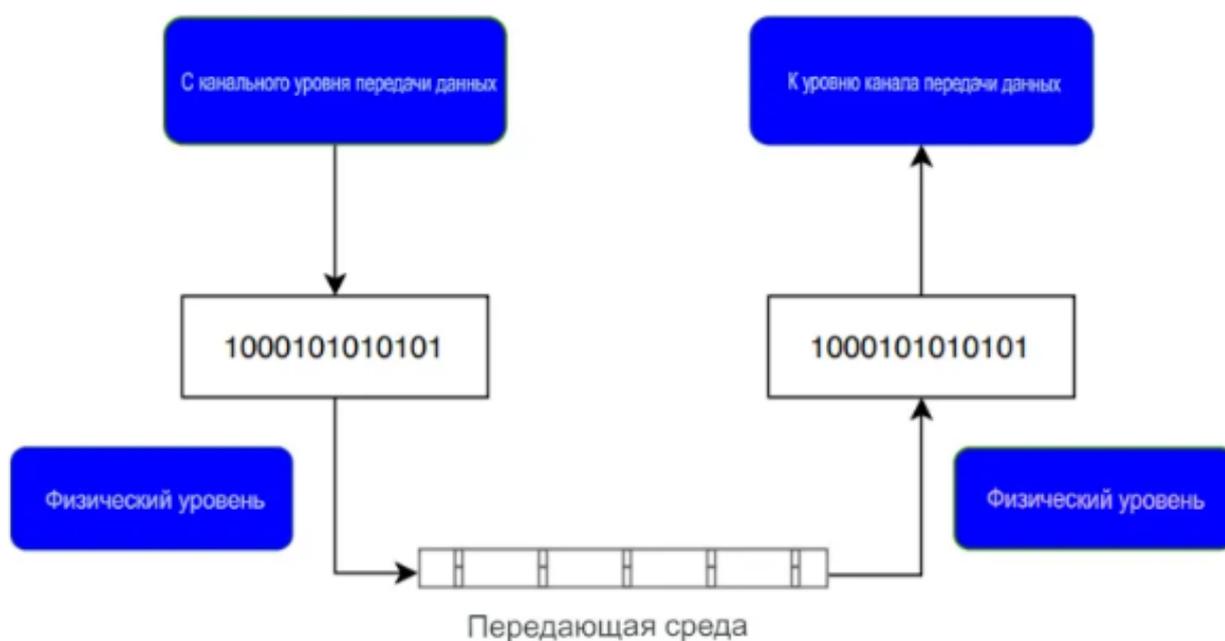


Рис. 4.5. Физический уровень в модели OSI

данных, он преобразует необработанные данные в пакеты, называемые кадрами. С помощью рамки он также добавляет заголовок и трейлер. Заголовок и трейлер содержат информацию (рис. 4.6).

Основная ответственность канального уровня передачи данных заключается в управлении потоком данных. Предположим, некоторые данные передаются с одного сервера с высокой степенью обработки на другой сервер с низкой степенью обработки. Уровень канала передачи данных гарантирует совпадение скорости передачи данных между двумя серверами и отсутствие повреждения данных. Уровень канала передачи данных также отвечает за контроль ошибок и контроль доступа. Наиболее популярной компьютерной сетевой технологией, используемой на канальном уровне передачи данных, является Ethernet.

Сетевой уровень передаёт данные с одной передающей станции на другую. Это также помогает выбрать кратчайший путь от одного хоста к другому, чтобы доставить данные в наилучшее возможное время. Этот процесс называется маршрутизацией. Он также помещает IP-адреса отправителя и получателя в заголовок. Сетевой уровень обеспечивает логическое соединение между различными сетевыми устройствами. Это также играет важную роль в решении проблем. Когда входящие данные поступают на сетевой уровень, он добавляет адрес назначения и адрес источника с заголовком (рис. 4.7).

Сетевые уровни используют различные протоколы, такие как IPv4 / IPv6, ARP, ICMP, для выполнения своих функциональных возможностей.

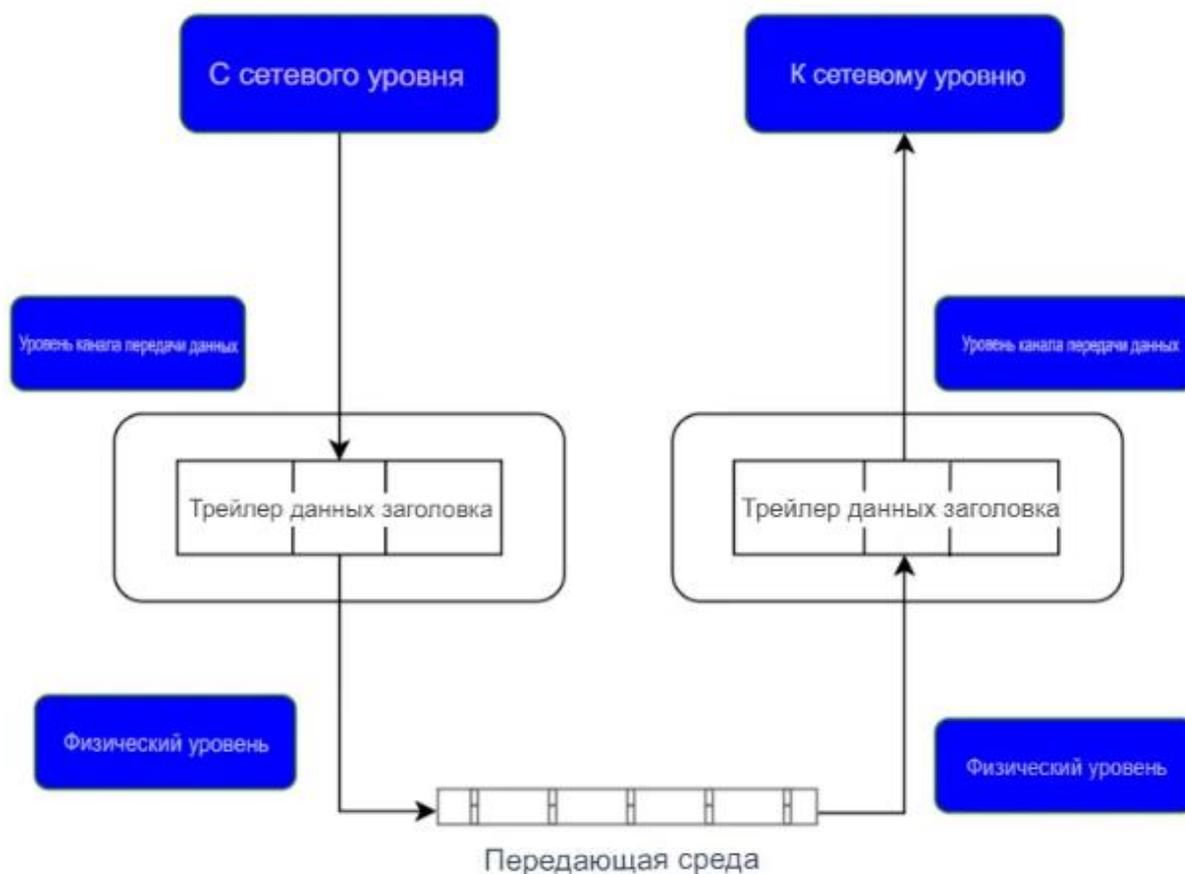


Рис. 4.6. Канальный уровень в модели OSI

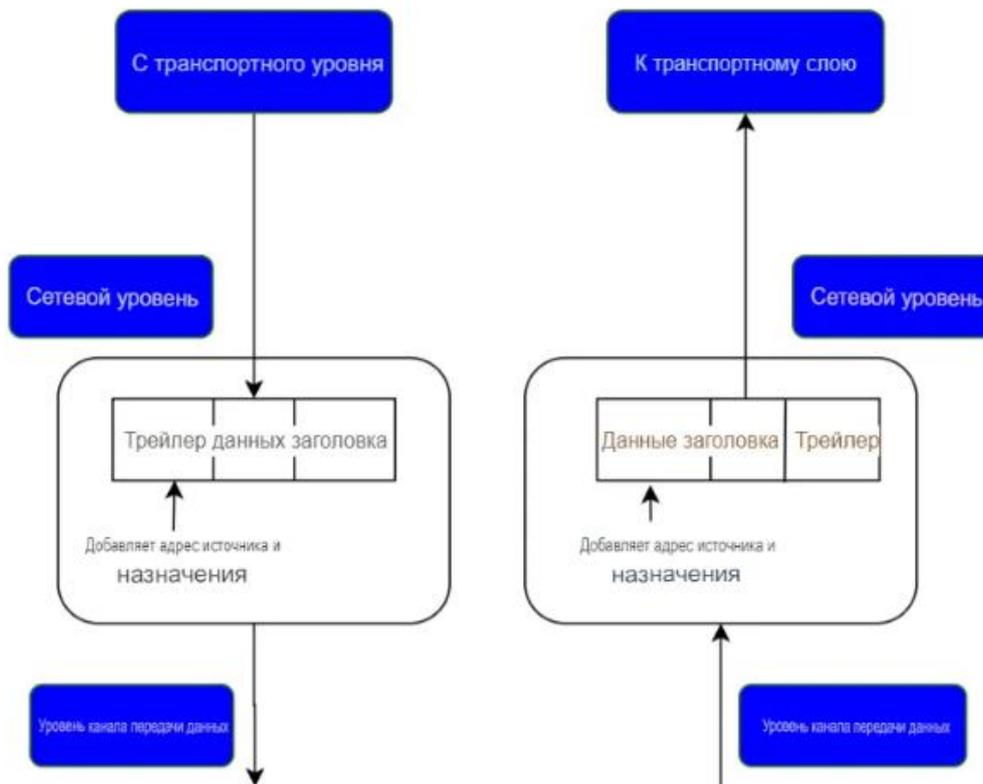


Рис. 4.7. Сетевой уровень в модели OSI

Транспортный уровень работает между сетевым и прикладным уровнями. Это обеспечивает сквозную и полную передачу данных. Он также предоставляет подтверждение узлу-отправителю, когда передача данных завершена. Если во время передачи произошла ошибка, транспортный уровень повторно передаёт данные. Транспортный уровень получает пакеты от сетевого уровня и делит пакеты на более мелкие пакеты, известные как сегменты. Этот процесс называется сегментацией. Он также контролирует поток и ошибки данных и помогает данным успешно доходить до получателя (рис. 4.8).

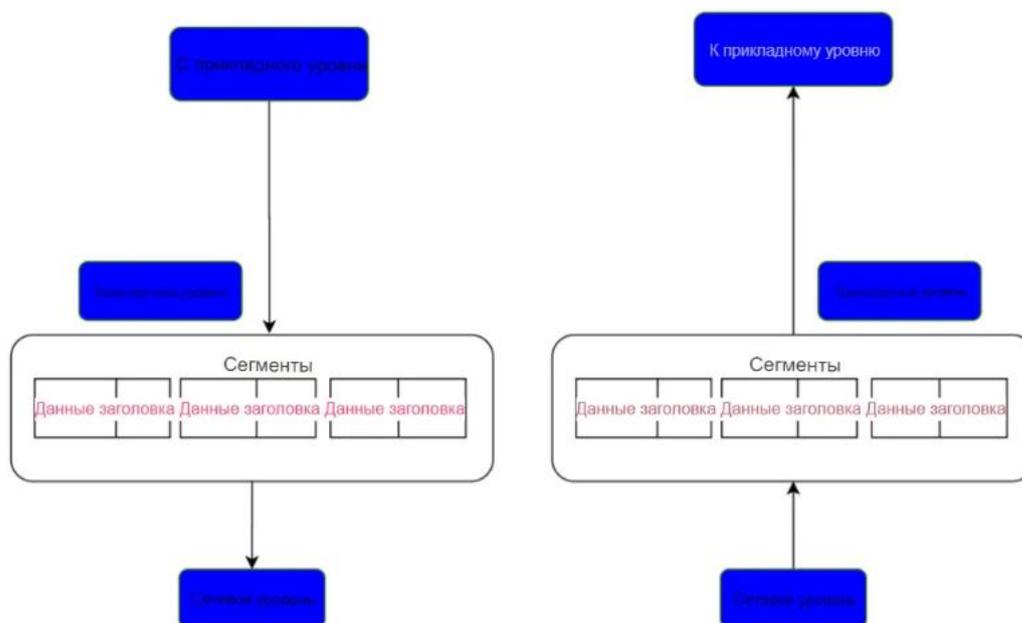


Рис. 4.8. Транспортный уровень в модели OSI

На стороне получателя транспортный уровень принимает данные в виде сегмента. Он повторно собирает сегмент и выдаёт подтверждение успешного преобразования данных. Поскольку транспортный уровень занимается передачей пакетов между станцией-отправителем и станцией-получателем, он в основном использует протоколы TCP, UDP для передачи пакетов.

Информация в сети, передаваемая по глобальным сетям (WAN), использует протокол UDP (это протокол без установления соединения) для реализации нескольких сетевых приложений, таких как потоковое видео и аудио. Кроме того, UDP уменьшает задержку в сети. Кроме того, он исключает рукопожатие и не требует настройки соединения между источником и получателем. Однако передача информации с использованием UDP не может обеспечить управление потоком через процесс связи. Следовательно, используя UDP, мы не можем обнаружить потерянные пакеты. Следовательно, повторная передача потерянных пакетов невозможна. Приложения реального времени в основном используют UDP. Однако потеря пакета без обнаружения делает UDP ненадёжным протоколом. Потеря пакетов является одной из основных проблем в сети при использовании UDP. Кроме того, поскольку в UDP нет механизма контроля ошибок, он просто отбрасывает пакет как только обнаруживается ошибка. Кроме того, передача большого количества данных с использованием UDP может вызвать перегрузку в сети. С другой стороны, UDP минимизирует задержку передачи. Кроме того, для этого не требуется устанавливать соединение между отправителем и получателем. Кроме того, он предлагает широковещательную и многоадресную передачу. UDP использует небольшой заголовок. Следовательно, обработка пакетов занимает меньше времени. Допустим, отправитель отправляет n количество пакетов получателю. Получатель получил m количество пакетов. Если $m < n$, в сети происходит потеря пакетов. Протокол UDP полностью полагается на сетевой стек, включая аппаратные и программные системы. Существует шесть основных причин потери пакетов в UDP: перегрузка сети, проблемы с оборудованием, сбой программного обеспечения, проблемы с подключением, уязвимости и неисправная инфраструктура (рис. 4.9).

Перегрузка в сети является основной причиной потери пакетов в UDP, поскольку каждая сеть связи имеет ограничение потока. Например, загруженность сети похожа на дорожную пробку, когда превышение максимального количества транспортных средств, разрешённых на данной дороге, может привести к замедлению или остановке движения в часы пик. Перегрузка в сети может



Рис. 4.9. Протокол UDP

увеличить время, необходимое пакету для достижения пункта назначения. Следовательно, это может привести к увеличению задержки в сети. Кроме того, сервер ожидает определённое количество времени для получения пакетов. Из-за высокой задержки мы можем столкнуться с таймаутом соединения, если пакеты не придут в указанное время. Кроме того, когда сетевой трафик достигает более высокого порога подключения, передача UDP-пакетов прерывается из-за высокой задержки. Поскольку приложения UDP не созданы для извлечения или повторной отправки отброшенных пакетов, происходит потеря пакетов.

Обновление аппаратного обеспечения в сети имеет жизненно важное значение для поддержания безопасности и производительности. Аппаратные средства, такие как маршрутизаторы, предотвращают попадание несанкционированных пакетов в сеть, реализуя различные функции, включая маршрутизацию пакетов и управление трафиком. Брандмауэр – ещё один жизненно важный компонент сети, который отфильтровывает входящие и исходящие данные. Однако устаревшие компоненты могут значительно снизить скорость передачи данных по сети и привести к потере пакетов. К сожалению, некоторые компании игнорируют необходимость модернизации оборудования, что приводит к потере пакетов и перебоям в подключении. Следовательно, своевременное обновление аппаратного обеспечения и внедрение современных аппаратных компонентов имеет важное значение для уменьшения потери пакетов и поддержания безопасности.

Во время передачи по сети одновременные нежелательные операции могут замедлить передачу пакетов. Программные ошибки связаны с аппаратным обеспечением. Программное обеспечение, работающее на неисправном оборудовании, может вызвать ряд проблем, включая потерю пакетов. Следовательно, крайне важно регулярно контролировать сетевое оборудование. Иногда исправление или обновление аппаратного обеспечения автоматически устраняет ошибки программного обеспечения. Кроме того, ошибки программного обеспечения или сбои в работе сети могут привести к сбою передачи. Передача UDP может быть прервана из-за поведенческих сбоев, таких как взаимоблокировка, сбой достижимости, отсутствие действий по сохранению жизни и взаимное исключение. Обнаружение сбоя программного обеспечения требует от инженеров-программистов применения различных тестов, верификации и валидации, что является дорогостоящей задачей. Большинство компаний, внедряющих приложения UDP, не включают процедуру тестирования программного обеспечения, что может увеличить вероятность потери пакетов во время обработки операций UDP.

Сетевое подключение влияет на пакеты, передаваемые по сети. Проводное и беспроводное подключение может повлиять на качество сигналов как положительно, так и отрицательно. Некоторые приложения, использующие беспроводное подключение, – это камеры видеонаблюдения, интеллектуальные видеодомофоны и интеллектуальные розетки с Wi-Fi. Такие приложения используют UDP для передачи информации. Однако беспроводные сигналы сталкиваются с физическими перебоями, которые ухудшают работу устройств, подключённых к шлюзам. Если говорить о препятствиях в этой среде, которые мо-

гут привести к потере пакетов при беспроводной передаче, то к ним можно отнести металл, бетонные стены, металлическую обрешётку, керамическую плитку, тонированное стекло, зеркала и гипсокартон и др. Разнообразие препятствий способствует блокированию сигналов. Таким образом, беспроводное подключение может привести к потере пакетов, поскольку протокол UDP основан на непрерывной потоковой передаче данных. Однако потери пакетов в проводном носителе значительно меньше по сравнению с беспроводным носителем. Потеря пакетов в сети может произойти из-за кибератак и угроз.

Сеансовый уровень используется для установления соединения, поддержания и синхронизации сеансов между взаимодействующими устройствами. Он также обеспечивает аутентификацию и обеспечивает безопасность. При передаче данных в виде сегментов сеансовый уровень добавляет некоторые точки синхронизации. Если возникает какая-либо ошибка, передача возобновляется с последней точки синхронизации. Этот процесс называется синхронизацией и восстановлением (рис. 4.10).

Сеансовый уровень также играет важную роль в качестве контроллера диалогов. Контроллер диалогового окна определяет режим связи для сеанса. Он позволяет осуществлять связь между двумя системами в полудуплексном или полнодуплексном режиме. Чтобы позволить приложениям взаимодействовать с разными компьютерами, сеансовый уровень использует сетевые протоколы, такие как NetBIOS или PPTP.

Уровень представления предоставляет синтаксис и семантику данных, которыми обмениваются две сетевые системы. Он обеспечивает переводы и также известен как уровень перевода. Он также обеспечивает конфиденциальность данных, обеспечивая шифрование и дешифрование данных. Это помогает сократить количество битов, необходимых для представления данных. Этот процесс формально известен как сжатие данных (рис. 4.11).

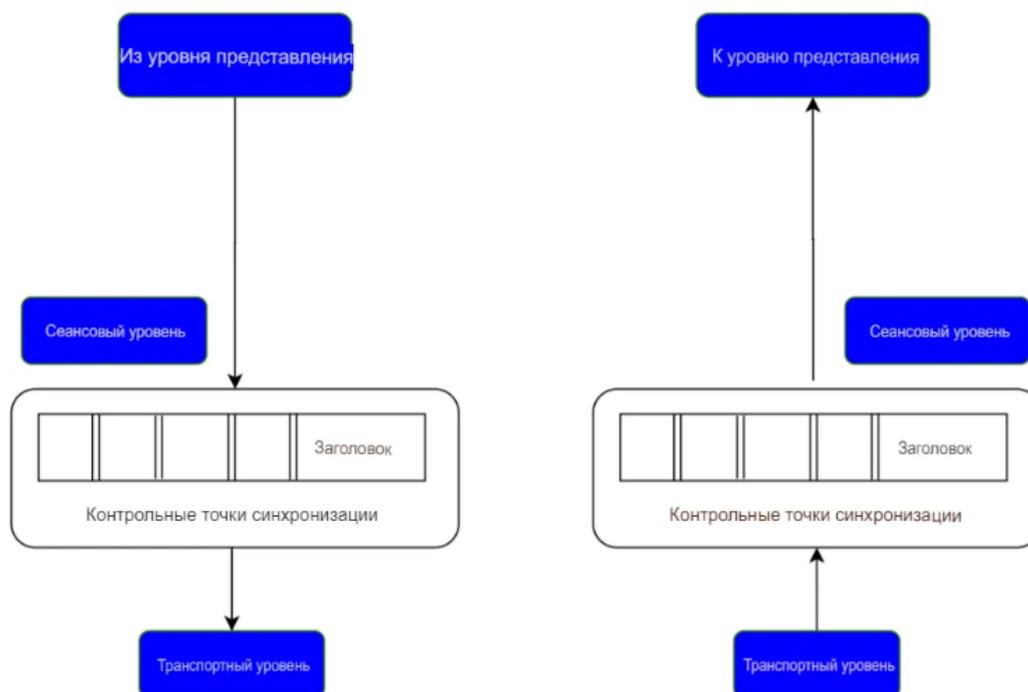


Рис. 4.10. Сеансовый уровень в модели OSI

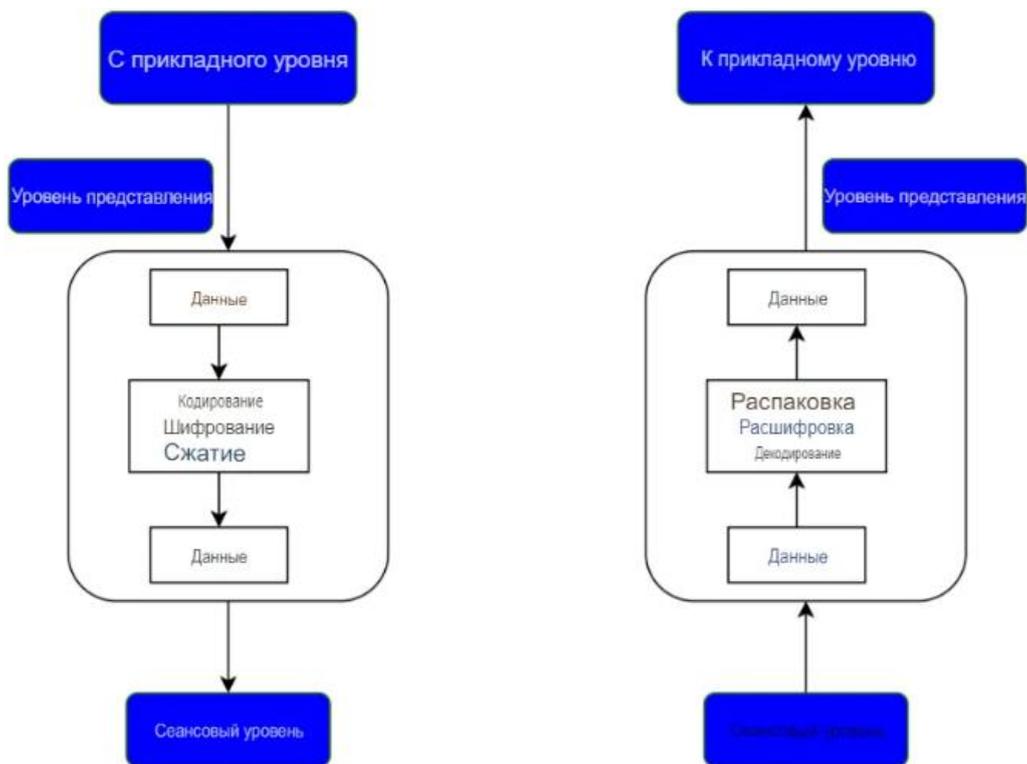


Рис. 4.11. Уровень представления в модели OSI

Чтобы обеспечить конфиденциальность и безопасность передаваемых данных, уровень представления использует SSL или TLS.

Прикладной уровень – это последний уровень в модели OSI, и он очень близок к программному приложению. Он действует как окно между программным приложением и конечным пользователем. Это помогает получить доступ к данным из сети и отобразить информацию пользователю. Прикладной уровень выполняет несколько функций, например, позволяет пользователю получать удалённый доступ к файлу, управлять файлами, извлекать определённые данные с компьютера (рис. 4.12).

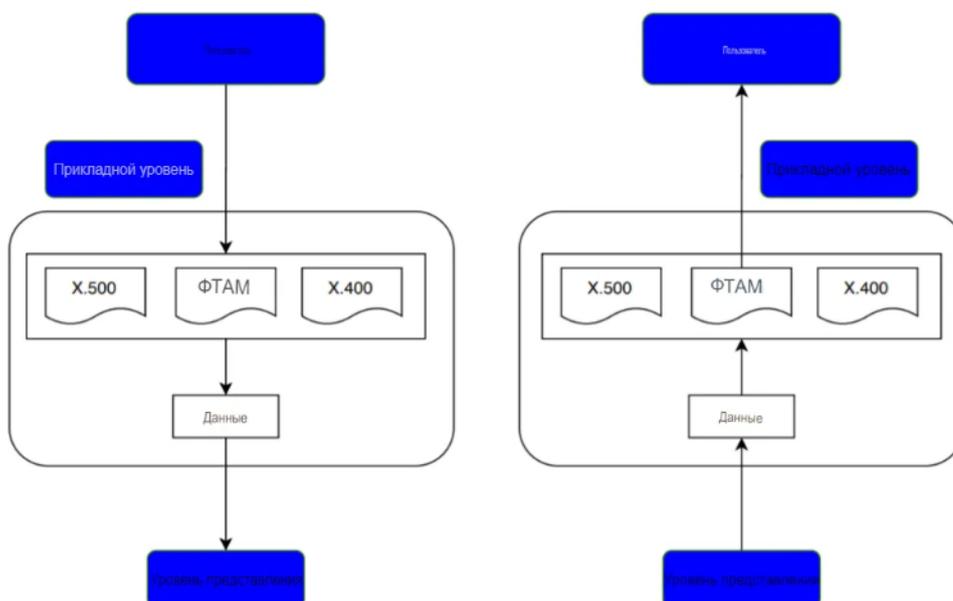


Рис. 4.12. Прикладной уровень в модели OSI

Популярными протоколами, используемыми на прикладном уровне, являются, например, HTTP, FTP, DNS, SNMP.

Виды сигналов телеизмерения:

- непрерывные (по параметру и по времени): сигналы интенсивности и модулированные гармонические колебания;
- непрерывные по параметру, но дискретные по времени (импульсные модулированные сигналы);
- дискретные по параметру и по времени (кодо-импульсные сигналы).

Сигналы интенсивности образуются путём однозначного изменения в зависимости от передаваемого сообщения $x(t)$ напряжения (или тока) в линии связи: $u = \varphi[x(t)]$ или $i = \varphi[x(t)]$.

Такие сигналы часто называют аналоговыми (сигнал – аналог измеряемой физической величины). Аналоговые сигналы из-за нестабильности коэффициента передачи линий связи и необходимости использования для каждого канала измерения отдельной линии не применяются для передачи сообщений в телеметрических системах.

Модулированные гармонические колебания образуются путём изменения одного из параметров высокочастотного гармонического колебания по закону передаваемого сообщения.

Уравнение высокочастотного колебания с частотой ω (несущая частота) имеет вид

$$u(t) = Um_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (4.1)$$

Параметрами этого колебания являются амплитуда Um_0 , частота ω_0 и фаза φ_0 . В зависимости от изменяемого параметра осуществляется амплитудная, частотная или фазовая модуляция.

При **амплитудной модуляции** (АМ) амплитуда Um изменяется по закону изменения модулирующего сообщения $x(t)$:

$$Um = Um_0 [1 + mx(t)], \quad (4.2)$$

где $m = \Delta Um / Um_0$ – коэффициент амплитудной модуляции; $x(t)$ – функция модулирующего сообщения в относительных единицах:

$$-1 \leq x(t) \leq 1.$$

Если $x(t)$ – гармонический сигнал: $x(t) = \cos \Omega t$, уравнение амплитудно-модулированного колебания примет вид

$$u(t) = Um_0 (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t. \quad (4.3)$$

Раскрыв скобки в выражении, получим:

$$\begin{aligned} U(t) &= Um_0 \cos \omega_0 t + Um_0 m \cos \Omega t \cos \omega_0 t = \\ &= Um_0 \cos \omega_0 t + Um_0 / 2m \cos(\omega_0 - \Omega)t + Um_0 / 2m \cos(\omega_0 + \Omega)t. \end{aligned} \quad (4.4)$$

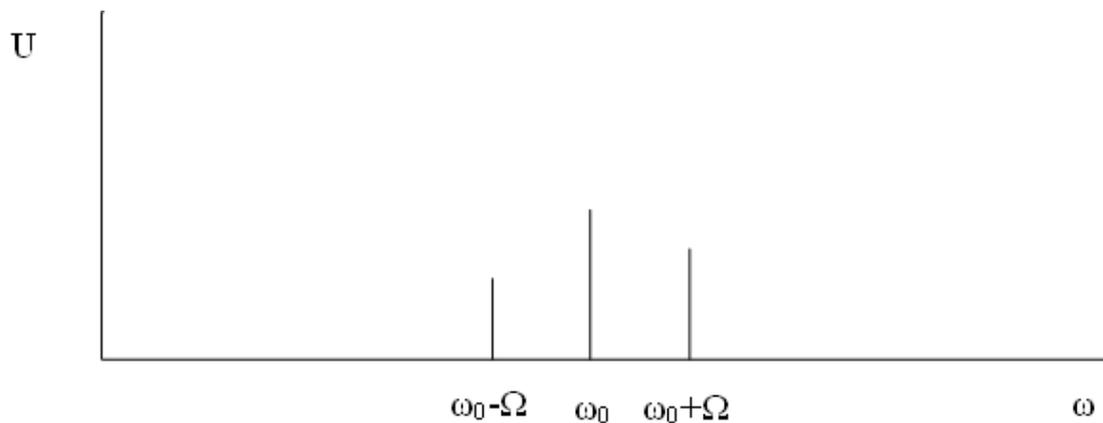


Рис. 4.13. Спектр амплитудно-модулированного колебания

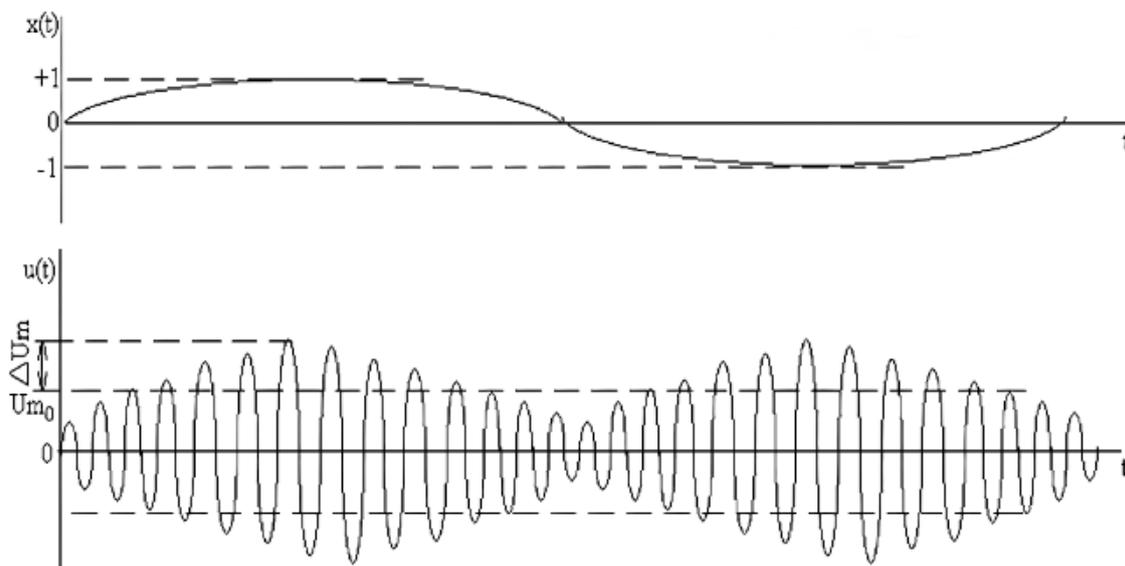


Рис. 4.14. Амплитудно-модулированное колебание

Таким образом, при амплитудной модуляции несущего гармонического высокочастотного колебания с частотой ω_0 , гармоническим низкочастотным колебанием с частотой Ω образуется сложное колебание, имеющее три гармонические составляющие с частотами ω_0 , $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$. Эти сигналы образуют спектр амплитудно-модулированных колебаний, вид которого представлен на рис. 4.13.

Очевидно, что для неискажённой передачи такого сигнала полоса пропускания передающего тракта должна быть не менее $2\Omega_{\max}$, где Ω_{\max} – максимальная частота спектра передаваемого сообщения $x(t)$. Графическое изображение амплитудно-модулированного колебание показано на рис. 4.14.

К недостаткам использования амплитудной модуляции для передачи информации относится существенное влияние на величину принятого сигнала изменения коэффициента передачи канала связи, что приводит к большим погрешностям передаваемого измерительного сигнала и сильному влиянию помех на передаваемое сообщение. Поэтому в телеметрических системах амплитудную модуляцию (когда модулирующим сигналом является непосредственно аналоговый измерительный сигнал) не используют.

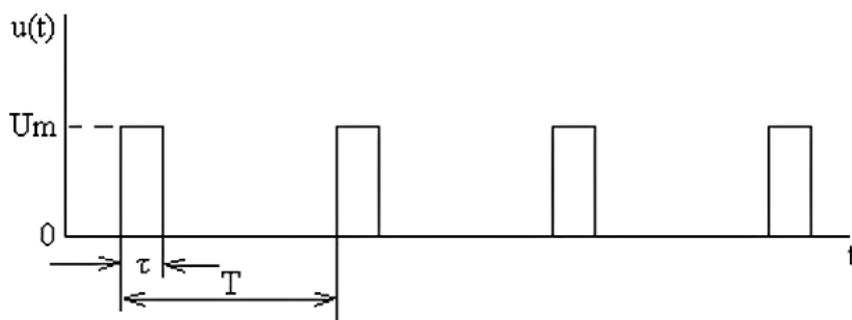


Рис. 4.15. Последовательность прямоугольных импульсов:

U_m – амплитуда импульсов; T – период следования импульсов; τ – длительность импульсов

При **частотной модуляции** (ЧМ) по закону передаваемого сообщения изменяется частота ω_0 несущего колебания. Изменение в значительных пределах амплитуды передаваемого сигнала не влияет на качество измерительной информации. Частотно-модулированный сигнал имеет существенно бóльшую помехоустойчивость по сравнению с амплитудно-модулированным. Недостатком частотной модуляции является большая ширина спектра сигнала (примерно в 10 раз больше, чем АМ сигнал при одинаковом спектре передаваемых сообщений) [9].

Фазовая модуляция (ФМ) по своим свойствам близка к частотной, однако для выделения переданного аналогового сигнала (детектирования) необходимо передавать опорный сигнал.

При **импульсной модуляции** проводится изменение по закону передаваемого аналогового сигнала одного из параметров последовательности прямоугольных импульсов.

Параметры импульсной последовательности показаны на рис. 4.15.

К параметрам импульсной последовательности относится также **частота** и **фаза** $f = 1/T$ – временная задержка Δt импульсов данной последовательности относительно исходной (опорной) последовательности. В отличие от фазы гармонических колебаний, имеющей угловую размерность (градусы или радианы), фаза импульсной последовательности задается обычно единицами времени.

Обобщённым параметром является **скважность** $C = T/\tau$.

Используются следующие виды импульсной модуляции:

- амплитудно-импульсная (АИМ);
- частотно-импульсная (ЧИМ);
- широтно-импульсная (ШИМ), когда пропорционально величине модулирующего сигнала изменяется длительность импульсов при постоянной частоте;
- фазово-импульсная (ФИМ), когда пропорционально величине модулирующего сигнала изменяется временная задержка импульсов по отношению к импульсам исходной последовательности.

4.2. ИНТЕРФЕЙС UU

Основным отличием стандарта LTE от предыдущих стандартов, включая различные релизы 3GPP, является реализация физического уровня интерфейса

UU. Как было отмечено ранее, физический уровень базируется на технологии OFDM (SC-FDMA) с модуляцией 4QAM, 16-QAM и 64-QAM. Уточним только некоторые моменты. Стандартом LTE предусмотрено использование максимально 2048 поднесущих в рабочей полосе частот с расстоянием между поднесущими $\Delta f = 15$ кГц. Такие значения выбраны исходя из возможностей элементной базы на момент принятия решения и в связи с необходимостью взаимной синхронизации E-UTRAN LTE и UTRAN UMTS. Длительность тракта $TS = 1/(2048 \times \Delta f) = 0,03255$ мкс, что соответствует тактовой частоте 30,72 МГц. Это в 8 раз выше тактовой частоты UTRAN. Таким образом, величина $\Delta f = 15$ кГц определила и длину информационного поля OFDM символа как $1/\Delta f \approx 66,7$ мкс, при этом длина циклического префикса зависит от радиуса соты.

Обмен информацией между UE eNB как в нисходящем, так и в восходящем направлениях осуществляется в виде радиокадров (radioframe) длительностью 10 мс. Структура радиокадра представлена на рис. 4.16. Формат кадра зависит от способа организации дуплексного обмена информацией. В LTE используются два способа организации дуплексности FDD (Frequency Division Duplex) TDD (Time Division Duplex) [10, 11].

FDD предусматривает использование двух разнесённых спектров частот: один для организации нисходящих каналов, другой – для восходящих. В этом случае формат радиокадра будет соответствовать рис. 4.17. При TDD использу-



Нормальный CP=4,7 мкс для сот радиусом до 1,4 км

Расширенный CP=16,7 мкс для сот радиусом до 120 км

Рис. 4.16. Структура радиокадра

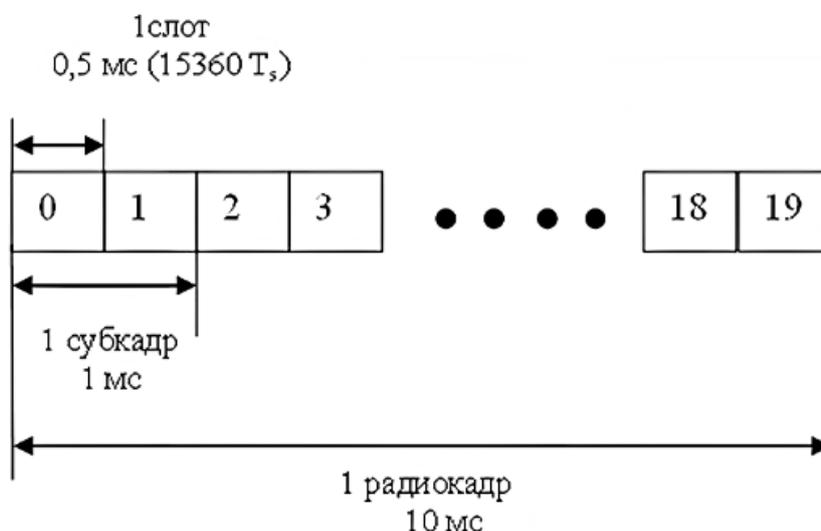


Рис. 4.17. Формат радиокадра FDD.

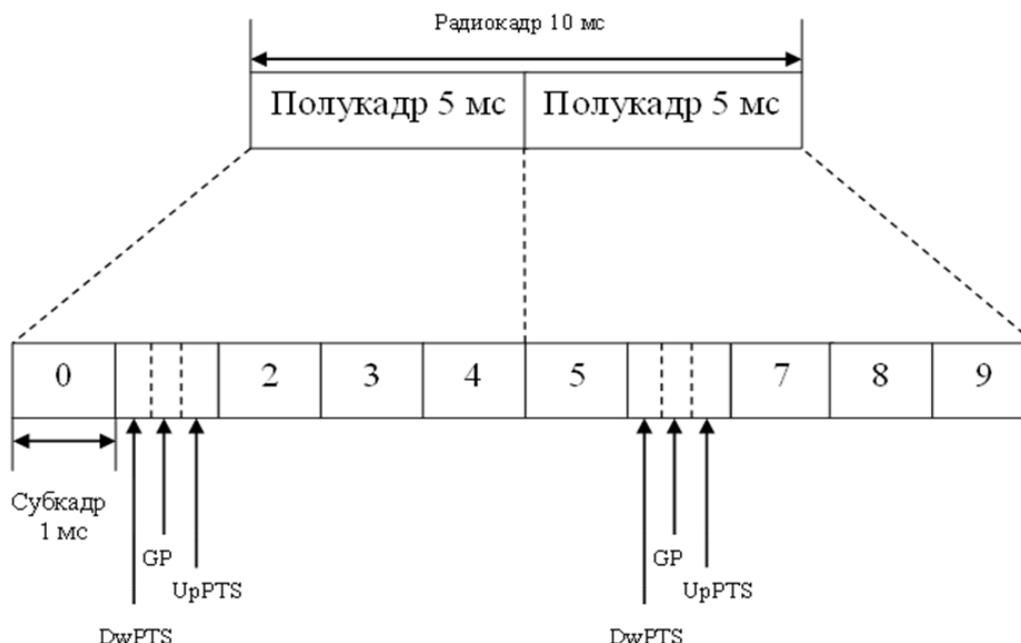


Рис. 4.18. Формат радиокадра при TDD

ется один спектр частот, и разделение нисходящих и восходящих направлений передачи осуществляется во времени в пределах радиокадра (рис. 4.18). Необходимость перехода от одного направления передачи к другому требует определения «точки переключения», для чего используется пилотное поле. В этом поле выделяют специальные пилотные слоты: DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) – пилотный слот нисходящего направления и UpPTS (Uplink Pilot Slot) – пилотный слот восходящего направления. DwPTS и UpPTS располагаются последовательно вместе с защитным полем GP (Guard Period).

Для осуществления обмена радиокадрами UE должна знать, с кем общаться, т.е. идентифицировать соту (eNB) и уметь выделить каждый радиокадр из общего потока. Следовательно, UE должна быть синхронизирована с eNB. Для осуществления синхронизации в нисходящем канале eNB передаёт два синхросигнала PSS (Primary Synchronization Signal) и SSS (Secondary Synchronization Signal). Синхросигналы генерируются на базе идентификатора соты (eNB). В LTE 504 идентификатора сот (Cell ID), которые разделены на 168 групп (N 2 – номер группы сот) по три в каждой группе (N1– номер соты в группе). PSS генерируется на основе N2, а SSS на основе N1. Синхросигналы размещают в одном OFDM символе и для них резервируются 72 поднесущие. При FDD синхросигналы размещают в 0 и 5 субкадрах, как это показано на рис. 4.19. В случае TDD – в субкадрах 1 и 6. Таким образом, приняв PSS и SSS, UE идентифицировала соту, в которой она находится и может распознавать радиокадры и их формат в процессе обмена информацией.

Весь каналный ресурс стандарта LTE разделяется на ресурсные блоки. Соответственно, это минимальный элемент, которым оперирует eNB при выделении каналного ресурса. Ресурсный блок занимает 12 расположенных подряд поднесущих и один слот, в котором, в зависимости от длины CP, располагаются шесть или семь OFDM-символов, как это показано на рис. 4.20.

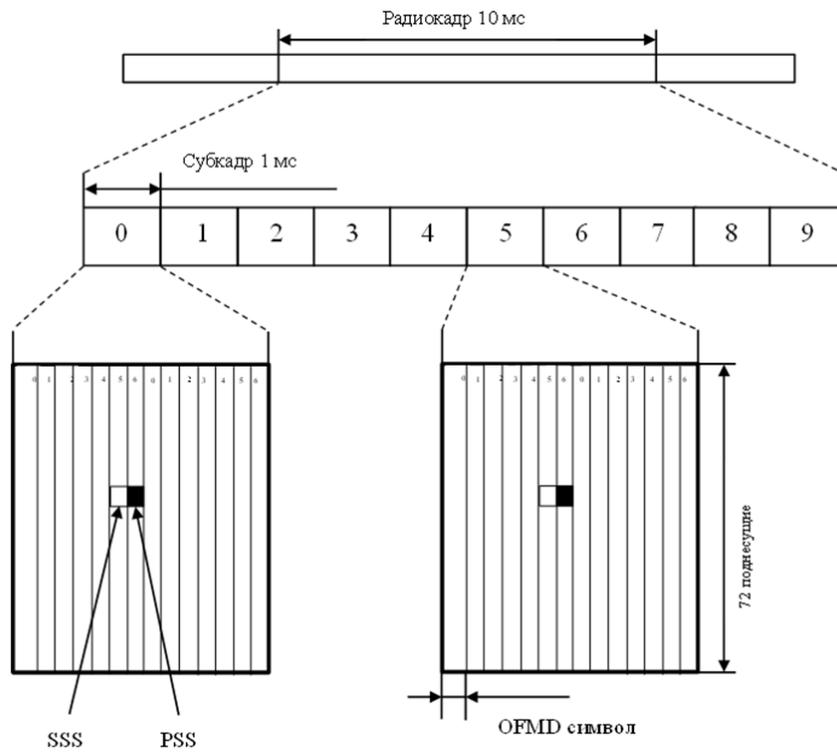


Рис. 4.19. Синхросигналы, размещённые в 0 и 5 субкадрах

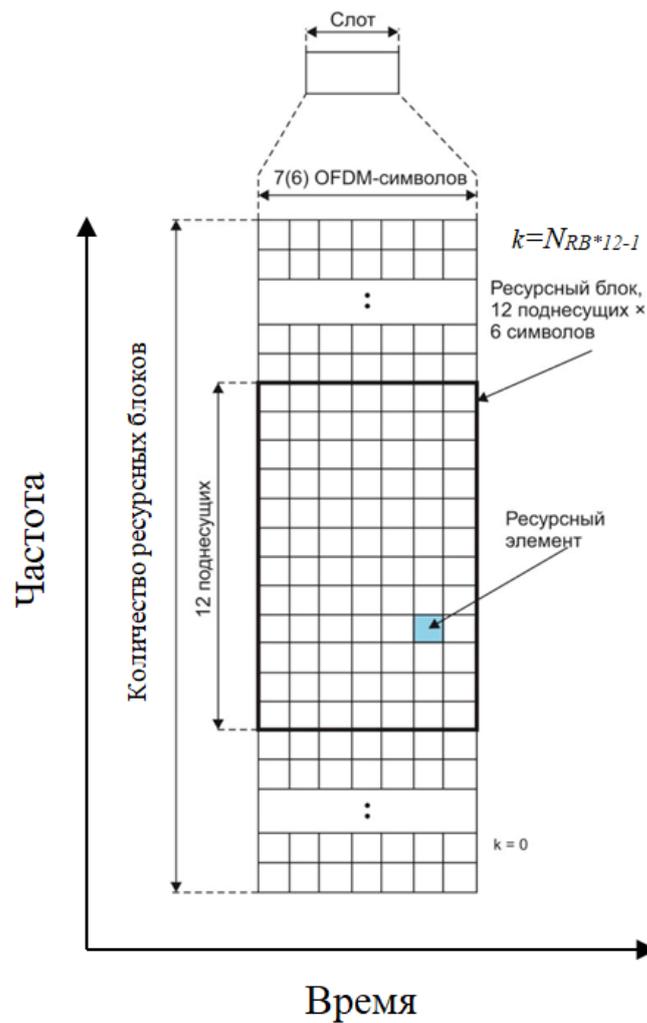


Рис. 4.20. Канальный ресурс стандарта LTE, разделённый на ресурсные блоки

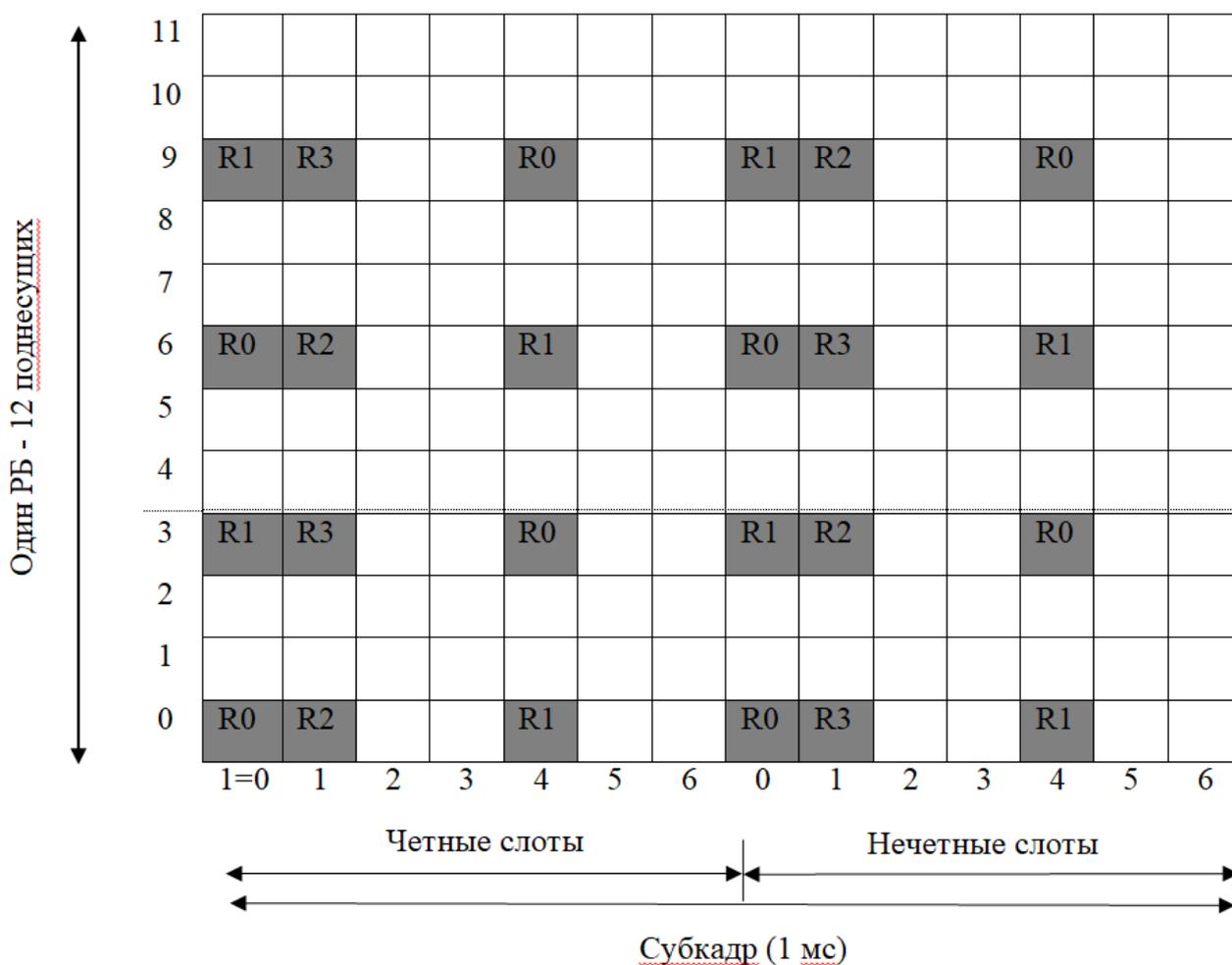


Рис. 4.21. Место расположения опорных символов в ресурсном блоке

Таким образом, один ресурсный блок максимально может содержать $12 \times 7 = 84$ OFDM-символов (ресурсных элементов). Зная способ модуляции, можно определить, какую скорость передачи информации он может обеспечить. Реальная скорость передачи информации в нисходящем направлении (от eNB к UE) будет ниже из-за передачи опорных символов и управляющих каналов. Опорные символы необходимы для оценки условий передачи для каждой из антенн в случае использования MIMO. Место расположения опорных символов в ресурсном блоке четко определено (рис. 4.21). Кроме того, четко определена и форма опорного символа. В E-UTRA LTE специфицированы шесть полос частот, что и определяет номенклатуру приёмопередающей радиоаппаратуры (табл. 4.1). 3GPP в спецификации TS 36.101 V10.0.0 определило диапазон частот для организации радиоканалов при FDD (табл. 4.2) и при TDD (табл. 4.3).

4.1. Полосы частот, определяемые номенклатурой приёмопередающей радиоаппаратуры

Полоса частот (МГц)	1,4	3	5	10	15	20
Количество поднесущих	72	180	300	600	900	1200
Число ресурсных блоков	6	15	25	50	75	100

4.2. Характеристики диапазонов частот для организации радиоканалов при FDD

Номер диапазона	Частоты передачи вверх UE → NB (МГц)	Частоты передачи вниз eNB → UE (МГц)	Разнос частот между каналами вверх и вниз (МГц)
	$F_{\min} - F_{\max}$	$F_{\min} - F_{\max}$	$F - F$
1	1920...1980	2110...2170	190
2	1850...1910	1930...1990	80
3	1710...1785	1805...1880	95
4	1710...1755	2110...2155	400
5	824...849	869...894	45
7	2500...2570	2620...2690	120
8	880...915	925...960	45
9	1749,9 ...1784,9	1844,9...1879,9	95
10	1710...1770	2110...2170	400
11	1427,9...1452,9	1475,9...150,9	48
12	698...716	728...746	30
13	777...787	746...756	-31
14	788...798	758...768	-30
17	704...726	734...746	30
18	815...830	860...875	45
19	830...845	875...890	45
20	832...862	791...821	-41
21	1447,9...1462,9	1495,9...1510,9	48
23	2000...2020	2180...2200	180
24	1626,5...1660,5	1525...1559	-101,5
25	1850...1915	1930...1995	80

4.3. Характеристики диапазонов частот для организации радиоканалов при TDD

Номер диапазона	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Частоты передачи (МГц)	1900... 1920	2010... 2025	1850... 1910	1930... 1990	1910... 1930	2570... 2620	1880... 1920	2300... 2400	2496... 2690	3400... 3600	3600... 3800

5. СЕТИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Наиболее важное отличие сетей следующего поколения от традиционных систем заключается в том, что вся информация, циркулирующая в сети, разделена на две составляющие. Эта информация предназначена для обеспечения коммутации и подключения абонентов и предоставления услуг, а также непосредственно пользовательских данных, содержащих полезную нагрузку, необходимую абоненту. Пути прохождения сигнальных сообщений и пользовательской нагрузки могут не совпадать. Сегодня основным устройством для голосовых услуг в сетях NGN является Softswitch – программный коммутатор, который управляет VoIP сессиями. Приоритетной функцией программного коммутатора является связь сети нового поколения NGN с существующей традиционной сетью TFOР посредством сигнальных сообщений и медиашлюзов, которые могут быть выполнены в одном устройстве. МСЭ уделяет особое внимание сетям 5G, 6G и искусственному интеллекту (ИИ) как областям инноваций, необходимым для развития более «умных» обществ. Система 5G – это новое поколение стандартов подвижной связи, позволяющее улучшить качество обслуживания конечных пользователей за счёт предложения новых приложений и услуг на гигабитных скоростях, а также существенно повысить эффективность и надёжность соединения. Ожидается, что эффективность сетей 5G будет повышена благодаря ИИ, который используется для обработки данных, управления сетевыми ресурсами и их координации, а также повысится уровень интеллекта соединённых и автономных систем [12, 19]. С этой целью МСЭ начал разработку концепции «ИМТ на период до 2020 года и далее», которая станет основой для исследований в области 5G и последующих поколений, которые начали активно проводиться по всему миру. МСЭ создал Оперативную группу по машинному обучению для будущих сетей, включая 5G. Эта оперативная группа изучает сценарии использования, требования и условия предоставления услуг, интерфейсы, протоколы, алгоритмы, архитектуру сетей, учитывающую машинное обучение. Кроме того, рассматриваются стратегии модернизации сетей 4G до уровня 5G операторами беспроводной связи для улучшения своих сетей 4G – особенно в городских районах, где развёртывание сетей 5G будет приоритетным.

5.1. ПЯТОЕ ПОКОЛЕНИЕ 5G

5G – это стандарты подвижной связи последующего поколения, определяемые МСЭ. ИМТ-2020 (5G) – это название систем, компонентов и связанных с ними элементов, поддерживающих расширенные возможности, превосходящие возможности систем ИМТ2000 (3G) и ИМТAdvanced (4G).

Стандарты Международной подвижной электросвязи – 2020 (ИМТ-2020):

- подготавливают почву для исследовательских работ в области 5G, которые начинают проводиться в различных странах мира;
- определяют основу и общие цели процесса стандартизации 5G;
- представляют дорожную карту для руководства этим процессом до его завершения к 2020 году (рис. 5.1, 5.2).

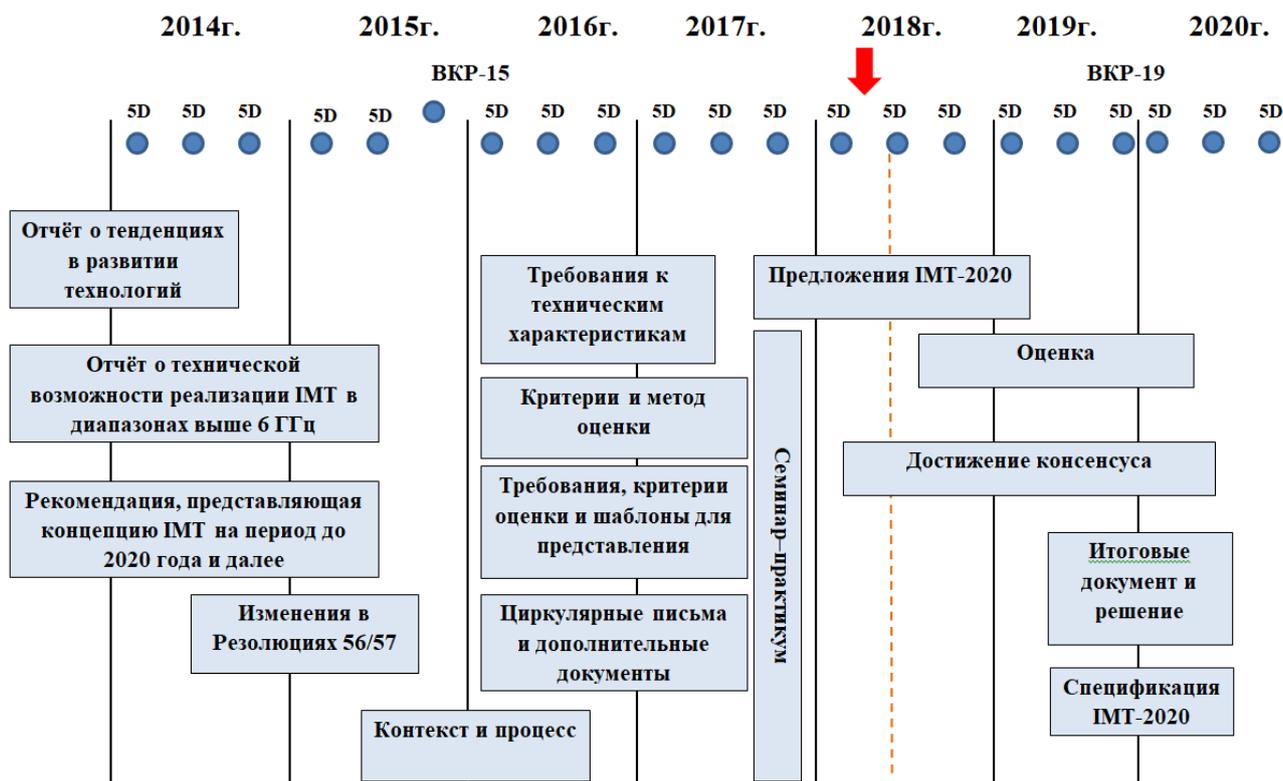


Рис. 5.1. Подробная хронология и процесс IMT-2020 в МСЭ-R

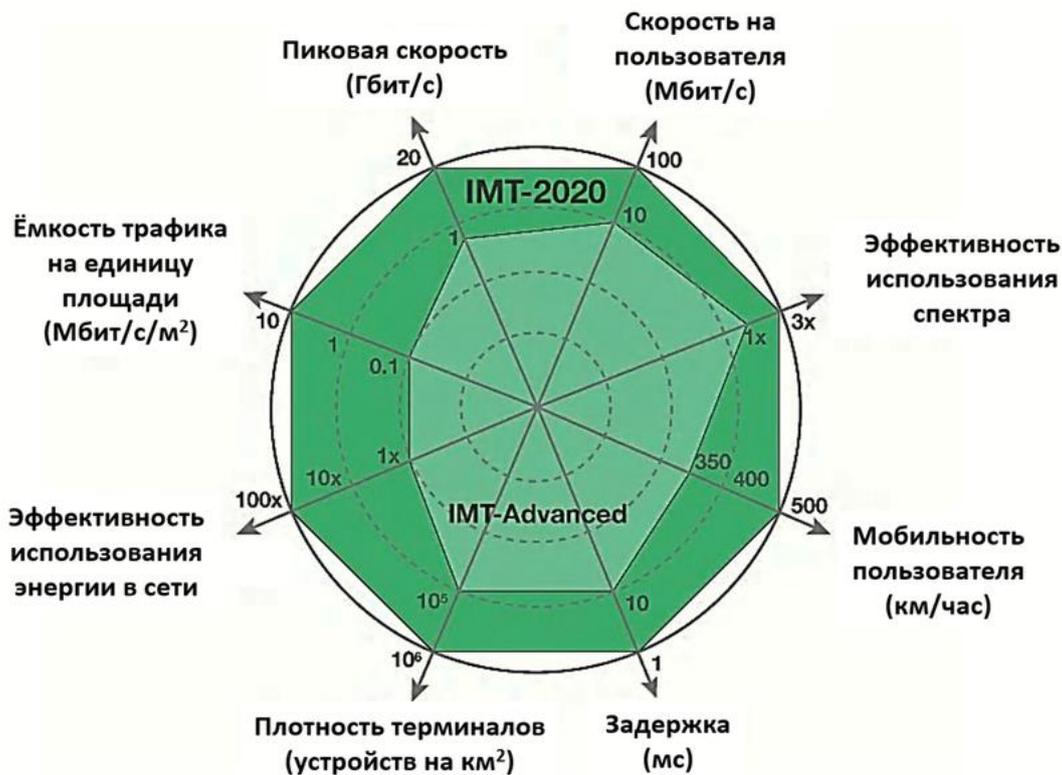


Рис. 5.2. Характеристики IMT-2020

Рассмотрим структуру 5G.

Миллиметровые волны (mmWave), т.е. радиочастоты в диапазоне от 30 до 300 ГГц, очевидно, не являются чем-то новым. На самом деле, первые исследования в их области относятся к закату XIX в. У них есть ряд различных

применений, однако до сих пор они мало использовались в телекоммуникациях, хотя и обещают несравнимо более высокую скорость передачи данных. Это связано с тем, что они имеют относительно небольшой радиус действия, вызванный высоким затуханием, т.е. их склонностью терять силу по мере поглощения воздухом или влажностью. Существует отрицательная корреляция между частотой и её диапазоном (чем выше частота, тем короче диапазон). Вот почему, говоря о 5G, мы различаем диапазон частот низкого (600...850 МГц), среднего (2,5...3,7 ГГц) и высокого (25...39 ГГц) диапазонов, поскольку каждый из них обладает различными характеристиками. Более высокие диапазоны, очевидно, обеспечивают лучшую скорость, но за счёт меньшего радиуса действия.

Формирование луча. Кроме того, в ячейках 5G используется технология обработки сигналов, называемая формированием луча. Это позволяет им направлять волны на конкретное устройство, используя сигнал от нескольких антенн. Обычно сигнал распространяется во всех направлениях. Но если несколько антенн, расположенных в непосредственной близости, передают один и тот же сигнал в одно и то же время, то это вызывает помехи. Для некоторых волн эта интерференция будет конструктивной (т.е. она будет нести сигнал дальше), а для некоторых – разрушительной (она ослабит его). Таким образом, вы можете создать направленный «луч», а не беспорядочное «кольцо» сигнала. Формирование луча не является совершенно новой концепцией и даже сейчас используется в некоторых устройствах Wi-Fi корпоративного уровня для усиления сигнала. И хотя улучшение качества сигнала, безусловно, является приятным преимуществом, для 5G формирование луча – это главное. Частоты, используемые в сетях 5G, гораздо более восприимчивы к помехам и не могут действительно хорошо проходить через препятствия, такие как стены. Таким образом, возможность направлять сигнал становится решающим фактором для технологий 5G.

Разделение сети. Последним звеном в этой технологической головоломке является разделение сети. Это тип сетевой архитектуры, который позволяет создавать полностью независимые виртуальные «срезы» внутри физической сети, каждый из которых удовлетворяет определённым потребностям. Это особенно важно в контексте Интернета вещей. Понятно, что все проекты Интернета вещей в целом требуют больших сетевых затрат. Однако не все элементы проекта предъявляют одинаковые требования к сети, тем более, что проекты Интернета вещей, как правило, очень широки и разнообразны, охватывая множество различных устройств и приложений. С помощью сетевого «среза» можно настраивать параметры сети для различных приложений, чтобы более эффективно распределять ресурсы. Например, основные операции будут иметь более высокие требования к уровню обслуживания и всегда будут иметь приоритет, даже в критических условиях.

Сценарии использования 5G

Технология 5G принесёт с собой высокую скорость передачи данных и малое время задержки, благодаря которым общество стремительно войдёт в новую эру «умных» городов и Интернета вещей (IoT). Отраслевые заинтересо-

ванные стороны выявили несколько потенциальных сценариев использования сетей 5G, а МСЭР определил три важные категории этих сценариев использования (рис. 5.3):

1) усовершенствованная подвижная широкополосная связь (eMBB) – усовершенствование широкополосной связи в помещениях и вне помещений, внутрикорпоративное сотрудничество, дополненная и виртуальная реальность;

2) интенсивный межмашинный обмен (mMTC) – IoT, отслеживание материальных активов, «умное» сельское хозяйство, «умные» города, мониторинг энергопотребления, «умный» дом, удалённое наблюдение;

3) сверхнадёжная передача данных с малой задержкой (URLLC) – автономные транспортные средства, «умные» электросети, дистанционное наблюдение за пациентами и телемедицина, автоматизация производства.

Причина, по которой 5G считается таким прорывом, заключается в том, что многие эксперты считают, что 5G может поддерживать до миллиона устройств на квадратный километр – в десять раз больше, чем 4G. 5G может не только обрабатывать больше устройств, но и лучше справляться с ними. Стандарт, который был установлен Международным союзом электросвязи – сектором радиосвязи (МСЭ-R) для технологий 4G (IMT-Advanced), имел пиковую скорость передачи данных в 1 Гбит/с (табл. 5.1). Для IMT-2020, т.е. технологий 5G, планка была поднята до 20 Гбит/с. Конечно, «пик» далёк от «среднего», но это показывает, насколько велик потенциал 5G, и мы уже можем видеть некоторые впечатляющие скорости в сетях, которые были созданы до сих пор. Никого не нужно убеждать в том, что более быстрые и ёмкие сети лучше, но для Интернета вещей это решающие факторы. Само количество подключенных устройств постоянно растёт, и по мере того, как каждое из них становится всё более сложным, оно собирает и отправляет всё больше и больше информации, накапливая колоссальный объём данных. От того, насколько быстро все эти устройства могут обмениваться данными, зависит, насколько полезными они станут на самом деле. Вот почему у 5G есть ещё одно важное преимущество –



Рис. 5.3. Сценарии использования 5G

5.1. Скорость загрузки и время задержки всех поколений сети

	1G	2G	3G	4G	5G
	1980-е годы	1990-е годы	2000-е годы	2010-е годы	2020-е годы
Теоретическая скорость загрузки	2 кбит/с	384 кбит/с	56 Мбит/с	1 Гбит/с	10 Гбит/с
Время задержки	Н/д	629 мс	212 мс	60...98 мс	< 1 мс

задержка, т.е. задержка отклика. Опять же, «золотой стандарт» для 4G составляет 10 мс, для 5G – всего 1 мс. Это не кажется такой уж большой разницей, особенно учитывая, что буквальное «моргание глаза» занимает более 300 мс.

Таким образом, тремя основными сценариями использования 5G, определёнными МСЭ-R, являются сверхнадёжная связь с низкой задержкой (URLLC), расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB) и массовая связь машинного типа (mMTC). URLLC, пожалуй, является самым важным обещанием 5G IoT. Это набор функций, который гарантирует, что сеть будет иметь низкую задержку и в то же время будет сверхнадёжной.

EMBB – это обещание обработки огромных объёмов данных на больших площадях с низкой задержкой. Наиболее часто обсуждаемые приложения для этого, возможно, не столь монументальны, как для URLLC, но они, вероятно, являются наиболее привлекательными сценариями 5G IoT для общественности. Предполагается, что EMBB обеспечит идеальное покрытие в густонаселённых общественных местах (например, на стадионах во время спортивных мероприятий), а также полностью иммерсивную виртуальную реальность. Последнее может создать большую нагрузку на сеть, так как требует очень высокого разрешения (поскольку изображение находится гораздо ближе к глазу) и потоков с удвоенной громкостью (отдельно для каждого объектива).

И последнее, но не менее важное: mMTC гарантирует, что устройства, подключённые к сети Интернета вещей 5G, могут иметь как низкое энергопотребление, так и потребление данных. Это особенно важно для всех «умных» вещей, которые соединены в гигантские сети: «умные города», «умные фабрики» и т.д.

Технология 5G и требования к спектру

Сети радиодоступа. Большинство развёрнутых в настоящее время наружных подвижных сетей 4G основано на макросотах. Однако макросотами, охватывающими обширные географические районы, трудно обеспечить плотное покрытие, малое время задержки и высокую пропускную способность, необходимые для некоторых применений 5G (как показано на рис. 5.4).

Маленькие ячейки. Чтобы компенсировать ограниченный диапазон, технологии 5G требуют так называемых малых ячеек. Их «малость» по сравнению с размерами вышек сотовой связи, к которым мы сейчас привыкли. Поскольку они имеют соответственно меньший радиус действия, идея состоит в

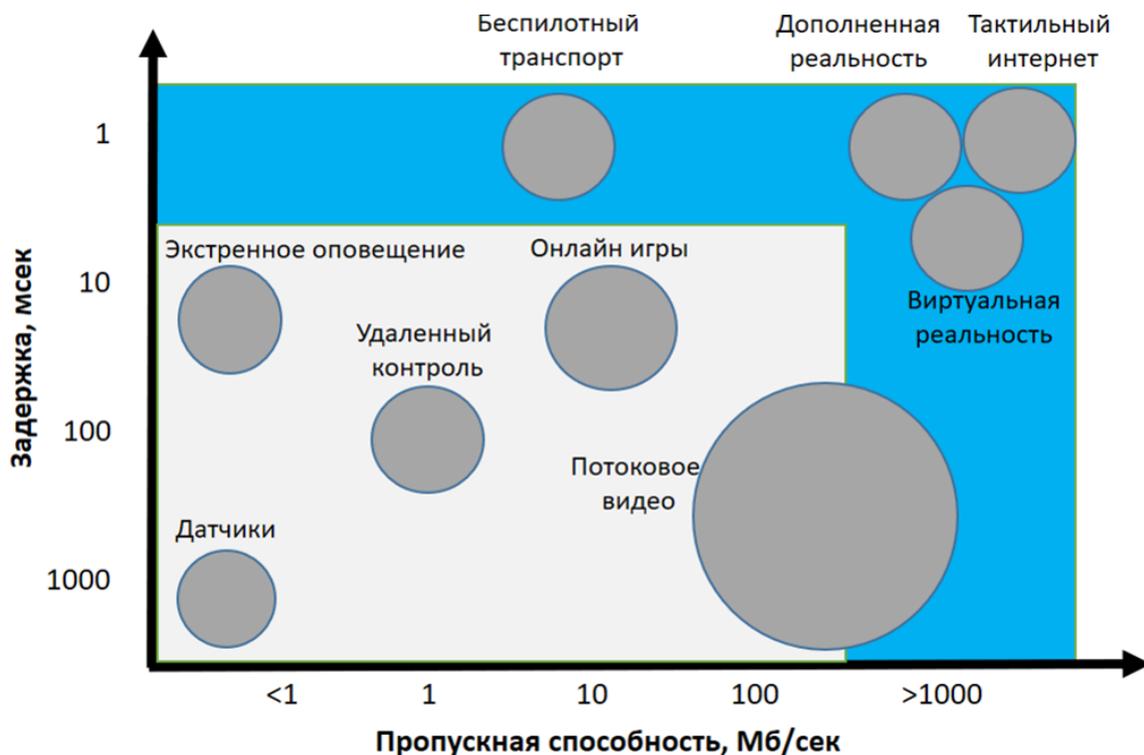


Рис. 5.4. Требования к пропускной способности и задержке для применений 5G

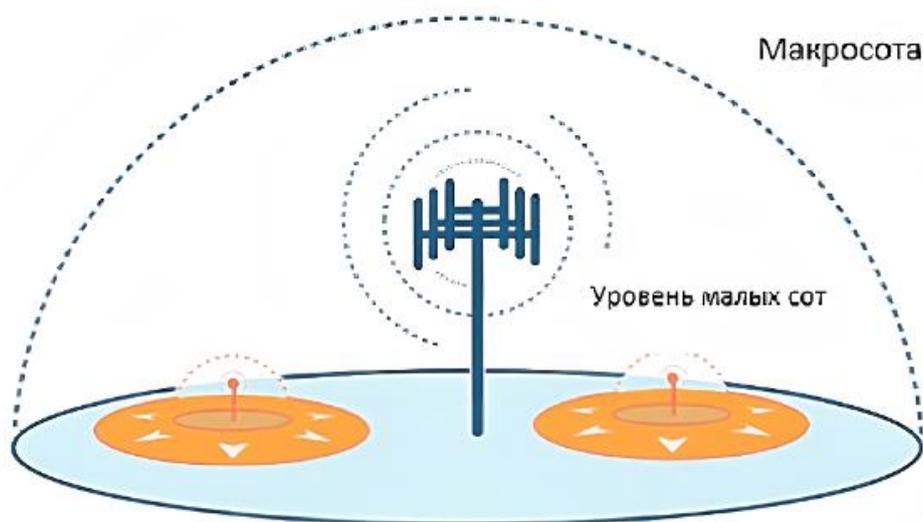


Рис. 5.5. Сети с большими и малыми сотами

том, чтобы создать плотную сеть из этих ячеек для обеспечения соответствующего покрытия с поддержкой фемтосот, обеспечивающих покрытие внутри помещений (дома или в небольших офисах). Каждое устройство в ячейке (будь то микро- или макроэлемент) взаимодействует с антенной по выделенному каналу (рис. 5.5). Поэтому, учитывая, что количество доступных каналов ограничено, развёртывание меньших ячеек с меньшим радиусом действия окупается увеличением количества доступных каналов. Таким образом, ячейки меньшего размера могут вместить больше устройств.

Поскольку малые соты должны обеспечивать плотное покрытие, их антенны приходится монтировать на элементах уличной инфраструктуры – автобусных остановках, фонарных столбах, светофорах и т.п. Часто рядом с ними



Рис. 5.6. Пример антенной системы, поддерживающей малые соты, и уличный шкаф

устанавливается уличный шкаф, в котором размещаются радиоаппаратура оператора, источники питания и средства подключения. На рисунке 5.6 в качестве примера показаны установленная на фонарном столбе антенная система и соответствующий уличный шкаф.

Massive MIMO. С формированием луча связана ещё одна технология: massive MIMO (множественный ввод, множественный вывод). MIMO в целом позволяет передавать и принимать больше потоков данных одновременно. До сих пор устройства обычно обрабатывались в порядке живой очереди. Это означает, что каждое устройство должно было ждать своей очереди. Такая технология даст возможность обслуживать сразу несколько устройств. Поскольку массивный MIMO позволяет использовать сотни антенн, число устройств, обслуживаемых одновременно, также растёт [15, 20, 21].

Устройства интернета вещей сегодня используют широкий спектр беспроводных технологии. К ним относятся технологии ближнего действия, обычно использующие нелицензионный спектр, такие как Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и Z-wave, а также широкополосные технологии сотовой связи с использованием лицензированного спектра, такие как GSM, LTE и 5G. Также доступны альтернативные решения, такие как маломощные технологии, работающие в нелицензионном спектре, включая LoRa и Sigfox. Сотовые технологии, работающие в лицензированном спектре, предлагают ряд преимуществ для устройств Интернета вещей, включая улучшенную подготовку, управление устройствами и предоставление услуг. Что ещё более важно, сотовые сети предлагают глобальное покрытие и высокий уровень надёжности, безопасности и производительности, требуемые даже самыми требовательными приложениями Интернета вещей. Сегодняшние сети LTE или 4G будут продолжать сосуществовать с 5G, предлагая достаточный охват и пропускную способность для широкого спектра вариантов использования, поскольку в ближайшие годы охват 5G расширится по всему миру. 5G даёт IoT ряд преимуществ, которые недоступны при использовании 4G или других технологий. К ним относится способность 5G поддерживать огромное количество статических и мобильных устройств Интернета вещей, которые имеют широкий диапазон скорости, пропускной способности и требования к качеству обслуживания. Большинство из них можно сгруппиро-

вать по трём основным категориям – расширенная мобильная широкополосная связь (eMBB), массовый интернет вещей (известный как mMTC) и критически важные коммуникации. Развёртываемые сегодня сети 5G основаны на Сети 4G, которые используют как LTE для машин (LTE-M) и технологии узкополосного Интернета вещей (NB-IoT), при этом 5G обеспечивает функциональность, необходимую для поддержки как существующих, так и будущих вариантов использования.

GSMA ожидает, что 5G обеспечит высокоскоростную, маломощную, надёжную и безопасную мобильную широкополосную связь на ранних стадиях развёртывания. Со временем огромное количество устройств Интернета вещей будет подключено к сетям 5G, обеспечивая поддержку сверхнадёжной связи с низкой задержкой. Сочетание технологий 5G и Wireless Edge будет поддерживать сложные варианты использования, такие как автономное вождение, критичные по времени производственные процессы промышленного Интернета вещей, а также дополненную и виртуальную реальность (AR/VR). Мобильные сети Интернета вещей, использующие сотовую связь LTE-M- или NB-IoT-технологии, продолжают набирать обороты для приложений, требующих малой мощности в широком диапазоне (LPWA) связи. С точки зрения базовой сети, как существующее ядро LTE (Enhanced Packet Core/ EPC), так и новое ядро 5G (5GC), будут продолжать поддерживать развитие мобильного Интернета вещей в будущем.

5G предоставит новые возможности и гибкость для удовлетворения конкретных потребностей различных корпоративных клиентов. Хотя 4G используется во всём мире, он не сможет соответствовать скорости 5G и не сможет управлять огромным количеством устройств на сеть. В городах 5G позволит улучшить управление дорожным движением за счёт поддержки огромного количества подключений Интернета вещей к светофорам, камерам и датчикам дорожного движения. Интеллектуальные счётчики – поддерживается низкая стоимость 5G. Датчики и соединения Интернета вещей будут контролировать потребление энергии и помогут снизить потребление. В ближайшие годы подключение транспортных средств будет использоваться не только для потоковой передачи музыки и репортажей. Транспортные средства будут взаимодействовать с дорожной инфраструктурой, другими транспортными средствами на дороге и даже пешеходами. GSMA ожидает, что 5G расширит потребительский рынок Интернета вещей, предоставляя высокоскоростную, малозатратную, надёжную и безопасную расширенную мобильную широкополосную связь (eMBB) на ранних стадиях развёртывания. Усовершенствованный MBW будет поддерживать передачу потребительского видео высокой чёткости (например, ТВ и игры), иммерсивные коммуникации, такие как видеозвонки и дополненная виртуальная реальность, а также услуги «умного города», включая видеокamеры Интернета вещей для наблюдения. Самым большим преимуществом 5G будет его способность поддерживать большие объёмы трафика данных и большое количество пользователей, включая устройства Интернета вещей.

5.2. КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ 6G

6G – стандарт мобильной связи, который является концептуальной новейшей технологией мобильной связи беспроводной сети, известной как технология мобильной связи шестого поколения. Рассуждая об основных факторах, стимулирующих экономический рост государств на перспективу до 2030 г., специалисты возлагают надежды на внедрение мобильных сетей подвижной связи технологий 5G и 6G, искусственного интеллекта (ИИ), Интернета вещей (Internet of Things, IoT) и больших данных (Big Data). Такие технологии являются основой цифровой трансформации промышленного производства. Приведем общее определение Digital Transformation: «Цифровая трансформация – это глубокие и всесторонние изменения в производственных и социальных процессах, связанные с тотальной заменой аналоговых технических систем цифровыми и широкомасштабным применением цифровых технологий. Цифровая трансформация охватывает не только саму производственную деятельность, но и организационные структуры компаний и бизнес-моделей».

Тенденции развития сетей 6G

1. Повышающийся рост объема передаваемых данных и, как результат, потребность в большей ёмкости спектра. Сценарии использования сетей 6G (расширенная реальность (XR, Extended Reality), устройства для непосредственного обмена данными между компьютером и человеческим мозгом (BCI, Wireless Brain-Computer Interactions) требуют более высоких скоростей передачи данных по сравнению с сетями 5G, прежде всего, это связано с освоением более высоких диапазонов частот, вплоть до терагерц. Терагерцовая полоса относится к 100 ГГц – 10 ТГц, которая является полосой частот, намного превышающей 5 ГГц. От связи 1G (0,9 ГГц) до 4G (выше 1,8 ГГц) частота используемых беспроводных электромагнитных волн возрастает. Поскольку чем выше частота, тем больше допустимый диапазон пропускной способности и тем больше объем данных, которые могут быть переданы в единицу времени, «скорость сети стала быстрее».

2. Переход от оценки спектральной эффективности на единицу площади к оценке относительно объема пространства с учетом энергоэффективности. Сети 6G должны будут работать с наземными и воздушными пользовательскими устройствами, такими как летательные аппараты. Это потребует оценки эффективности использования спектра не только на единицу площади, но и на единицу объема, а также учета эффективности использования энергии.

3. Появление «умных» излучающих поверхностей. В существующих системах связи для создания сетей радиодоступа используются базовые станции, обеспечивающие радиопокрытие различных размеров и форм. Сети 6G положат основу для развития активных излучающих поверхностей, таких как стены, дороги и даже целые здания. Использование таких больших излучающих поверхностей для беспроводной связи будет способствовать развитию архитектуры сетей 6G.

4. Массовая доступность малых данных. Революция в области обработки данных продолжится в ближайшем будущем и перейдет от централизованных

больших данных к массивам распределённых «малых» данных. Системы 6G должны обеспечивать передачу как больших централизованных данных, так и огромного количества распределённых малых данных, которые потребуются для предоставления новых услуг.

5. Переход от самоорганизующихся сетей (SON) к самоподдерживающимся сетям (Self-Sustaining Networks (SSN)). Сети 6G потребуют смены парадигмы от использования классических технологий SON (когда сеть просто адаптирует свои функции к конкретным состояниям среды) к использованию технологий самоподдерживающихся сетей SSN, которые могут постоянно поддерживать свои ключевые показатели эффективности (KPI) в условиях высокой динамики и различных сценариев использования сетей 6G. Базой для создания сетей SSN являются технологии искусственного интеллекта (ИИ).

6. Конвергенция коммуникаций, вычислений, управления, локализации и зондирования (3CLS). Существующие системы мобильной связи выполняют одну основную функцию – беспроводная связь. Сети 6G будут одновременно выполнять такие функции, как связь, вычисления, управление, локализация и считывание, что необходимо для таких приложений, как XR, подключённая робототехника и автономные системы (CRAS) и системы распределённого реестра (DLT).

7. Расширение внедрения ИИ. Сочетание сетей 6G и технологий ИИ для улучшения сети 6G также стала неизбежной тенденцией, начиная с сетей 5G+. «Интеллектуальность» станет неотъемлемой характеристикой сети 6G: речь о так называемом «интеллектуальном подключении».

«Интеллектуальное подключение» будет одновременно отвечать двум требованиям:

- 1) все связанные подключённые устройства 6G в самой сети являются интеллектуальными, а соответствующие службы – интеллектуальными;
- 2) с другой стороны, сложная и огромная сеть сама нуждается в интеллектуальном управлении.

«Интеллектуальное подключение» будет основной характеристикой, поддерживающей главные три функции сети 6G: глубокое соединение, голографическое соединение и повсеместное соединение.

6. КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ «РАСЧЁТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОТОВОЙ СЕТИ СВЯЗИ»

Исходные данные для расчёта:

- 1) стандарт ССПО: частотный разнос между каналами F_k ;
- 2) полоса частот БС на передачу ΔF , МГц;
- 3) число обслуживаемых абонентов N_a ;
- 4) активность одного абонента в час наибольшей нагрузки (ЧНН) β , Эрл;
- 5) вероятность блокирования вызова P_b ;
- 6) допустимый процент времени $p(C)$ уменьшения $P_c/P_{\text{пом}}$ относительно защитного отношения, %;
- 7) площадь обслуживаемой территории S_0 , км²;
- 8) параметр α , определяющий диапазон случайных флуктуаций уровня сигнала, дБ;
- 9) чувствительность приёмника МС $P_{\text{прМС}}$, дБВт;
- 10) мощность передатчика БС $P_{\text{птБС}}$, Вт;
- 11) коэффициент усиления антенны БС $G_{\text{БС}}$, дБ;
- 12) высота подвеса антенны БС $h_{\text{БС}}$, м;
- 13) погонные потери в фидере БС α_0 , дБ.

1. Расчёт числа радиоканалов. Общее число частотных каналов, выделенных для развёртки сотовой сети связи в данном месте, определяется по формуле

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k), \quad (6.1)$$

где $\text{int}(x)$ – целая часть числа x ; F_k – полоса частот, занятая одним частотным каналом системы сотовой связи (частотный разнос между каналами).

Пример 1.

В цифровой системе DCS-1800: частотный разнос между каналами $F_k = 200$ кГц = 0,2 МГц.

Полоса частот БС на передачу ΔF , МГц. Для стандарта DCS-1800 находится в пределах 1805...1880 МГц, т.е., составляет 75 МГц. Рассчитаем общее число частотных каналов:

$$N_k = \text{int}(\Delta F / F_k) = \text{int}(75 / 0,2) = 375 \text{ частотных каналов.}$$

Для стандарта DCS-1800 в реальных условиях полоса частот БС на передачу находится в меньшем пределе, чем 1805...1880 МГц, поэтому существует $375 - 1 = 374$ частотных канала.

2. Определение размерности кластера. Для определения необходимой размерности кластера C при заданных значениях ρ_0 и p_t используют соотношение

$$p(C) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_1}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx \right] 100, \quad (6.2)$$

где $p(C)$ – процент времени, в течение которого соотношения мощность сигнала/мощность помехи на входе приёмника МС будет находиться ниже защитного отношения ρ_0 .

Интеграл представляет собой табулированную Q -функцию:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_1}^{\infty} \exp(-x^2/2) dx. \quad (6.3)$$

Нижний предел этого интервала имеет вид

$$X_1 = \frac{10 \lg(1/\beta_e) - \rho_0}{\alpha_p}, \quad (6.4)$$

где ρ_0 и α_p выражены в дБ; β_e определяется соотношением

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^M \beta_i \right) \exp \left[\frac{\gamma^2 (\alpha^2 - \alpha_e^2)}{2} \right]. \quad (6.5)$$

В свою очередь значения α_p и α_e определяются по формулам:

$$\alpha_p^2 = \alpha^2 + \alpha_e^2, \quad (6.6)$$

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{\gamma^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp(\gamma^2 \alpha^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^M \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^M \beta_i \right)^2} \right\}, \quad (6.7)$$

где α – параметр, который определяет диапазон случайных флуктуаций уровня сигнала в точке приёма;

$$\gamma = 0,1 \ln 10. \quad (6.8)$$

Коэффициент β_i в (6.7) представляет собой медианное значение затухания радиоволн на i -м направлении увеличения помехи. Эти коэффициенты обратно пропорциональны четвёртой степени расстояния до источника помехи мощности сигналов, приходящих на МС, представим в виде (6.9), приняв $R = R_0$ для своего сигнала и $R = R_j$ для j -го мешающего сигнала. Если энергетические параметры БС в сети одинаковы, то отношение медианной мощности j -го мешающего к медианной мощности своего сигнала:

$$\beta_j = (R_j/R_0)^{-n}. \quad (6.9)$$

6.1. Расчётные формулы для фрагмента частотно-территориального плана

Всенаправленная антенна БС		Секторная антенна БС, $\alpha = 120^\circ$	
мешающая БС	расчётные выражения	мешающая БС	расчётные выражения
M1	$R_1 = (q-1)R_0$	M1	$R_1 = (q+0,7)R_0$

Всенаправленная антенна БС		Секторная антенна БС, $\alpha = 120^\circ$	
мешающая БС	расчётные выражения	мешающая БС	расчётные выражения
М2 и М6	$R_2 = R_6 = (\sqrt{q^2 + q - 1})R_0$	М6	$R_6 = qR_0$
М3 и М5	$R_3 = R_5 = (\sqrt{q^2 + q + 1})R_0$	–	–
М4	$R_4 = (q + 1)R_0$	–	–

Величина М обозначает число базовых станций, которые «мешают», расположенных в соседних кластерах.

Пример 2.

Рассмотрим случай, для всенаправленной антенны, где угол диаграммы направленности $\varphi = 360^\circ$. Число секторов $N_s = 1$.

Рассмотрим однородную модель ЧТП при всенаправленных антеннах БС. Для неё известно: число БС – М = 6 при любой размерности кластера (рис. 6.1):

$$\beta_1 = \beta_2 = (q - 1)^{-4}, \quad \beta_3 = \beta_4 = q^{-4}, \quad \beta_5 = \beta_6 = (q + 1)^4. \quad (6.10)$$

Выберем значение размерности кластера $C = 3$:

$$\gamma = 0,1 \ln 10 = 0,23; \quad q = \sqrt{3C}; \quad q = \sqrt{3 \cdot 3} = 3. \quad (6.11)$$

Определим α_e^2

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{0,23^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp(0,23^2 \cdot 5^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^6 \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^6 \beta_i \right)^2} \right\} = 16,364 \text{ дБ}. \quad (6.12)$$

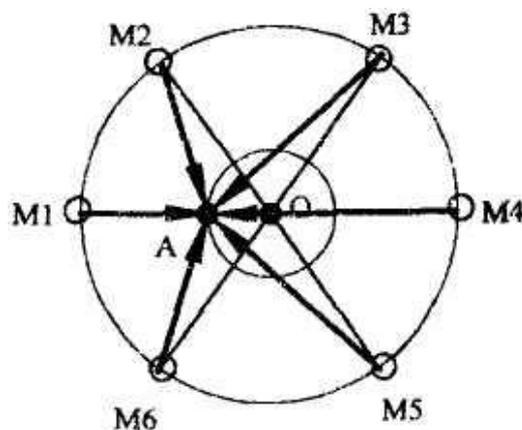


Рис. 6.1. Упрощённый фрагмент ЧТП

Вычислив квадратный корень, из получившегося значения получаем:

$$\alpha_e = \sqrt{16,364} = 4,045 \text{ дБ.}$$

Отсюда следует

$$\alpha_p = \sqrt{5^2 + 4,045^2} = 6,431 \text{ дБ.}$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^6 \beta_i \right) \exp \left[\frac{0,23^2 (5^2 - 4,045^2)}{2} \right] = 643,908 \text{ дБ.}$$

Теперь вычислим нижнюю границу Q -функции:

$$X_1 = \frac{10 \lg(1/643,908) - 10}{6,431} = -5,922.$$

Этому значению в табл. 6.1 соответствует величина, равная $1 - 0,161 \cdot 10^{-8}$, это значение приблизительно равно единице. Считая по формуле (6.6), получаем

$$p(C) \approx 1 \cdot 100 = 1.$$

Получившееся значение явно больше $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}(\rho_0)$, которое из задания равно 10.

Вывод: данный тип антенны и выбранное значение кластера не подходит для указанного стандарта.

Эффективным способом повышения отношения сигнал–интерференция является применение секторных антенн. Фрагменты ЧТП при $C = 7$ с использованием секторных антенн с шириной ДНА $\alpha = 120^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$ показаны на рис. 6.2. Секторы сот, в которых использованы одинаковые частоты, обозначены жирными линиями. При $\alpha = 120^\circ$ осталось два мешающих сигнала и изменилось R_j , как показано в табл. 6.1. Для варианта $\alpha = 60^\circ$ остался только один мешающий сигнал и расстояние $R_6 = (q + 0,7)R_0$ совпадает с расстоянием R_1 в табл. 6.1.

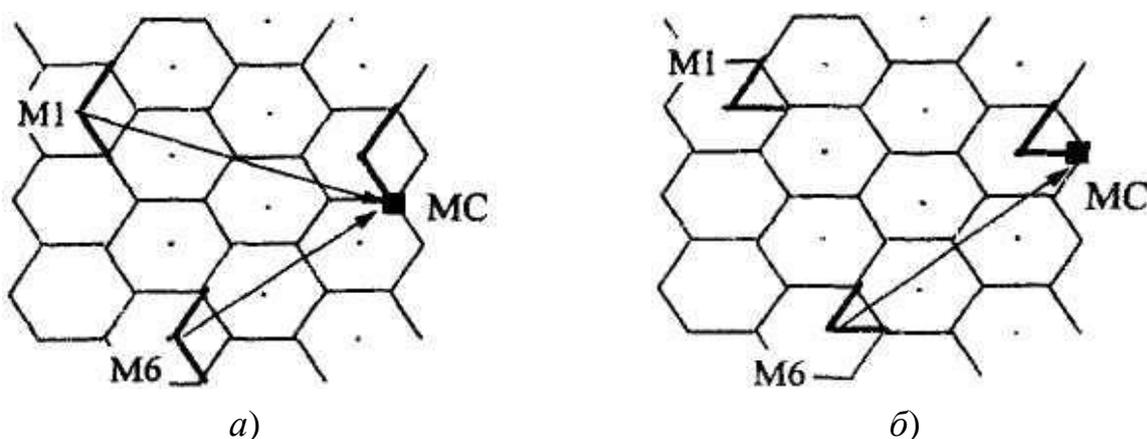


Рис. 6.2. Фрагменты ЧТП при $C = 7$ при использовании секторных антенн БС с шириной ДНА $\alpha = 120^\circ$ (а) и $\alpha = 60^\circ$ (б)

Пример 3.

Рассмотрим случай для направленной антенны, у которой угол диаграммы направленности $\varphi = 90^\circ$. Число секторов $N_s = 4$. Количество мешающих БС $M = 2$:

$$\beta_1 = (q + 0,7)^{-4}, \quad \beta_2 = q^{-4}. \quad (6.13)$$

Размерность кластера $C = 4$:

$$q = \sqrt{4 \cdot 4} = 4.$$

Определим α_e^2 :

$$\alpha_e^2 = \frac{1}{0,23^2} \ln \left\{ 1 + \left[\exp(0,23^2 \cdot 5^2) - 1 \right] \frac{\sum_{i=1}^2 \beta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^2 \beta_i \right)^2} \right\} = 17,682 \text{ дБ}. \quad (6.14)$$

Вычислив квадратный корень из получившегося значения, получим:

$$\alpha_e = \sqrt{17,682} = 4,025 \text{ дБ}.$$

Отсюда следует

$$\alpha_p = \sqrt{5^2 + 4,025^2} = 6,533 \text{ дБ};$$

$$\beta_e = \left(\sum_{i=1}^2 \beta_i \right) \exp \left[\frac{0,23^2 (5^2 - 4,025^2)}{2} \right] = 0,012 \text{ дБ}.$$

Теперь вычислим нижнюю границу Q-функции

$$X_1 = \frac{10 \lg(1/0,012) - 10}{6,533} = 1,384.$$

Этому значению в таблице соответствует величина, равная 0,0838. Считая по формуле (6.2), получаем:

$$p(C) \approx 0,0838 \cdot 100 = 8,38.$$

Получившееся значение немного меньше $\frac{P_c}{P_{\text{ш}}}(\rho_0) = 10$, отсюда вытекает,

что данный тип антенны является наиболее оптимальным. Следовательно, размерность кластера $C = 4$.

3. Расчёт числа радиоканалов, которые используются одной базовой станции. Число частотных каналов, которые используются для обслуживания абонентов в одном секторе соты, определяется по формуле

$$n_s = \text{int} (N_k / CN_s), \quad (6.15)$$

где N_s – число секторов.

Пример 4.

Общее число частотных каналов $N_k = 374$. Число секторов $N_s = 4$. Размерность кластера $C = 4$:

$$n_s = \text{int} (N_k / CN_s) = \text{int} \left(\frac{374}{4 \cdot 4} \right) = 23. \quad (6.16)$$

4. Расчёт допустимой телефонной нагрузки. Величина допустимой телефонной нагрузки в одном секторе одной соты определяется соотношением

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(P_B \sqrt{\pi n_0 / 2} \right) \frac{1}{n_0}} \right], \quad (6.17)$$

при условии, что

$$P_B \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}, \quad (6.18)$$

где $n_0 = n_s n_a$; n_a – число абонентов, которые могут одновременно использовать один частотный радиоканал. При использовании аналогового стандарта величина $n_a = 1$, для цифровых стандартов $n_a > 1$.

Пример 5.

Вероятность блокирования вызова $p_B = 0,1$. Проверим, удовлетворяет ли она условию, если $n_a = 2$:

$$p_B \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_0}}; \quad 0,1 < 0,118.$$

Рассчитаем величину допустимой телефонной нагрузки:

$$A = n_0 \left[1 - \sqrt{1 - \left(P_B \sqrt{\pi n_0 / 2} \right) \frac{1}{n_0}} \right] = 46 \left[1 - \sqrt{1 - \left(0,1 \sqrt{\pi 46 / 2} \right) \frac{1}{46}} \right] = 45.$$

5. Расчёт числа абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией.

При заданной активности одного абонента в час наибольшей нагрузки можно рассчитать число абонентов, которые обслуживаются одной БС по формуле

$$N_{\text{аБС}} = \text{int} (A / \beta) N_s. \quad (6.19)$$

Пример 6.

Величина допустимой телефонной нагрузки $A = 45$. Активность одного абонента в час наибольшей нагрузки $\beta = 0,06$ Эрл. Число секторов $N_s = 4$

$$N_{\text{аББ}} = \text{int} (A / \beta) N_s = \text{int} (45 / 0,06) 4 = 3000.$$

6. Расчёт количества базовых станций. Необходимое число базовых станций на заданной территории обслуживания определяется соотношением

$$N_{\text{БС}} = \text{int} (N_a / N_{\text{аББ}}), \quad (6.20)$$

где N_a – заданное число абонентов, которых обслуживает сотовая сеть связи.

Пример 7.

Число обслуживаемых абонентов $N_a = 20\,000$. Число абонентов, которые обслуживаются одной БС $N_{\text{аББ}} = 3000$:

$$N_{\text{БС}} = \text{int}(N_a/N_{\text{аББ}}) = 20\,000/3000 = 7.$$

7. Расчёт радиуса зоны обслуживания БС (радиуса соты). Величину радиуса соты можно определить, используя выражение

$$R_0 = \sqrt{1,21 \frac{S_0}{N_{\text{БС}}\pi}}. \quad (6.21)$$

Пример 8.

Необходимое число БС на заданной территории обслуживания $N_{\text{БС}} = 7$. Площадь обслуживаемой территории $S_0 = 10 \text{ км}^2$, значит:

$$R_0 = \sqrt{1,21 \frac{S_0}{N_{\text{БС}}\pi}} = \sqrt{1,21 \frac{10}{7\pi}} = 0,742 \text{ км.}$$

8. Расчёт величины защитного расстояния. Величина защитного расстояния между базовой станцией с одинаковыми частотными каналами определяется соотношением или расстояние повторного использования частот – расстоянием между центрами двух удалённых сот, начиная с которого, допускается повторное использование

$$d = R_0\sqrt{3C}. \quad (6.22)$$

Пример 9.

Размерность кластера $C = 4$. Величина радиуса соты $R_0 = 0,742$

$$d = R_0\sqrt{3C} = 0,742\sqrt{3 \cdot 4} = 2,57 \text{ км.}$$

9. Расчёт уровня сигнала на входе приёмника мобильной станции.

Необходимую мощность на входе приёмника МС $P_{\text{прМС}}$ при $h_{\text{БС}} = \text{const}$ и $P_{\text{пдБС}} = \text{const}$ определяют, пользуясь так называемым первым уравнением передачи:

$$P_{\text{прМС}} = P_{\text{пдБС}} + G_{\text{БС}} - 70 - 26,16 \lg(f, \text{ МГц}) + 13,82 \lg(h_{\text{БС}}, \text{ м}) - \\ - [45 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}}, \text{ м})] \lg(R, \text{ км}) - \alpha_{\text{фБС}}, \text{ дБ}, \quad (6.23)$$

где $G_{\text{БС}}$ – коэффициент усиления антенны базовой станции, дБ; f – средняя частота выделенного диапазона частот; $P_{\text{пдБС}}$ – мощность передатчика БС, дБВт; $\alpha_{\text{фБС}} = l_{\text{ф}}\alpha_0$ – потери в фидере БС, дБ; $l_{\text{ф}}$ – длина фидера, которая может быть равной или больше высоты подвеса антенны БС; α_0 – погонное ослабление фидера, дБ/м.

Пример 10.

Коэффициент усиления антенны базовой станции $G_{\text{БС}} = 6$ дБ. Средняя частота выделенного диапазона частот $f = 1747,5$ МГц. Мощность передатчика базовой станции $P_{\text{пдБС}} = 24,77$ дБВт. Потери в фидере базовой станции $\alpha_{\text{фБС}} = 1$ дБ.

Длина фидера, которая может быть равной или больше высоты подвеса антенны базовой станции – $l_{\text{ф}} = 150$ м. Погонное ослабление фидера базовой станции – $\alpha_0 = 0,01$ дБ/м:

$$P_{\text{прМС}} = P_{\text{пдБС}} + G_{\text{БС}} - 70 - 26,16 \lg(f, \text{ МГц}) + 13,82 \lg(h_{\text{БС}}, \text{ м}) - \\ - [45 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}}, \text{ м})] \lg(R, \text{ км}) - \alpha_{\text{фБС}} = 24,77 + 6 - 70 - 26,16 \lg(1747,5) +$$

$$+13,82\lg(150) - [45 - 6,55\lg(150)]\lg(0,742) - 1,5 = \\ = -39,23 - 77,96 + 30,13 + 4,73 = -88,49 \text{ дБВт.}$$

Вывод: полученная мощность удовлетворяет заданной чувствительности приёмника МС, которая равна 110 дБВт.

10. **Расчёт эффективности использования радиоспектра.** Важным параметром сотовой сети связи является эффективность использования радиоспектра γ , обусловленная числом активных абонентов на 1 МГц полосы частот на передачу (или приём) БС, т.е.

$$\gamma = \frac{N_a}{\Delta F}, \quad (6.24)$$

где ΔF – полоса частот на передачу (или приём):

$$\Delta F = F_k N_{\text{кБС}} C; \quad (6.25)$$

N_a – число активных абонентов:

$$N_a = N_{\text{кБС}} N_{\text{БС}} = N_{\text{кБС}} 1,21 \left(\frac{R_{30}}{R_0} \right)^2, \quad (6.26)$$

$$\gamma = 1,21 \frac{R_{30}^2}{R_0^2 F_k C}, \quad (6.27)$$

где $N_{\text{кБС}}$ – количество каналов, выделяемых для работы БС; R_{30} – радиус зоны обслуживания – территории, которую обслуживает ССПО, площадью $S_0 = \pi R_{30}^2$, отсюда

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0/\pi}{R_0^2 F_k C} = 1,21 \frac{S_0}{\pi R_0^2 F_k C}. \quad (6.28)$$

Пример 11.

Площадь обслуживаемой территории $S_0 = 10 \text{ км}^2$. Размерность кластера $C = 4$. Частотный разнос между каналами F_k . Величина радиуса соты $R_0 = 0,742$:

$$\gamma = 1,21 \frac{S_0/\pi}{R_0^2 F_k C} = 1,21 \frac{S_0}{\pi R_0^2 F_k C} = 1,21 \frac{10}{3,14 \cdot 0,550564 \cdot 0,2 \cdot 4} = 8,75.$$

6.1. РАЗРАБОТКА ЧАСТОТНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНА СЕТИ СВЯЗИ

6.1.1. ПРИНЦИП СОСТАВЛЕНИЯ ЧТП ССПО

Основные принципы составления частотно-территориальных планов (ЧТП) ССПО целесообразно рассмотреть на примере сотовой системы связи. Целью разработки ЧТП является определение топологии сети, при которой обеспечивается требуемый допустимый уровень интерференционных помех на совпадающих частотах. На практике из-за неоднородности рельефа и наземных объектов форма ячеек (зон доступа) далеко не всегда совпадает с правильными шестиугольниками. Точный прогноз конфигурации каждой ячейки является весьма сложной задачей. При этом точность прогноза определяется, с одной

стороны, точностью исходных данных об условиях распространения радиоволн (РРВ) и о пространственно-временном распределении информационной нагрузки (трафика) подвижных абонентов (ПА), а с другой стороны – точностью используемых моделей распространения радиоволн и обслуживания ПА. Кроме того, качество беспроводной связи и реальная конфигурация зон доступа существенно зависит от взаимного влияния различных относительно близко расположенных радиоэлектронных средств (РЭС).

Обычно при частотно-территориальном планировании различают три этапа расчётов в рамках решаемых задач анализа и синтеза. Анализ – расчёт конфигурации зон (электромагнитного) покрытия (радиосигналами с достаточной для связи мощностью $P_c > P_{c,тр}$). Синтез – выбор мест размещения, высот и ориентации антенн, а также мощности передатчиков базовых станций, при которых удаётся обеспечить заданную степень (в идеале – полную) электромагнитного покрытия заданной территории размещения подвижных абонентов. Анализ – расчёт конфигурации зон обслуживания подвижных абонентов с заданными вероятностно-временными характеристиками (ВВХ) информационного обмена. Синтез – выбор необходимого количества трафиковых каналов (приёмо-передатчиков – ПП) БС, при котором удаётся обеспечить заданные вероятностно-временные характеристики для заданной доли (в идеале – для всех) ПА на заданной территории их размещения.

Синтез – выбор необходимого количества и распределения частот между всеми приёмопередатчиками всех базовых станция сетей подвижной радиосвязи, при которых в пределах заданной территории размещения подвижных абонентов выполняются требования к электромагнитной совместимости (сохраняется неизменной конфигурация зон обслуживания, несмотря на взаимное влияние РЭС). При использовании технологий с множественным доступом с частотным разделением и адаптивным выбором свободных частот (подобных DECT) или с множественным доступом с кодовым разделением и одной несущей (подобных IS-95) указанная задача синтеза не решается, но анализ электромагнитной совместимости всё равно выполняется, иногда совместно с решением задач анализа и синтеза на первых двух этапах. При решении задач определения конфигурации зон покрытия (1 этап) и электромагнитной совместимости (3 этап) используются три класса моделей распространения радиоволн, отличающиеся составом используемых исходных данных о земной поверхности, а также сложностью и точностью расчётов затухания (loss-потери) радиоволн L , дБ между БС и мобильными станциями (МС) подвижных абонентов на расстоянии R , км на частоте F , МГц при высотах антенн БС H , м и мобильной станции h , м.

Первый класс – модели распространения радиоволн, чувствительные только к дальности R между базовой станцией и мобильной станцией и к обобщённому типу земной поверхности вокруг базовой станции, независимо от конкретного направления от базовой станции к мобильной станции. Конфигурация зоны покрытия одной БС при этом имеет форму круга (рис. 6.3, а). Можно выделить три типа данных моделей, отличающиеся степенью чувствительности к реальной земной поверхности вокруг анализируемой БС:

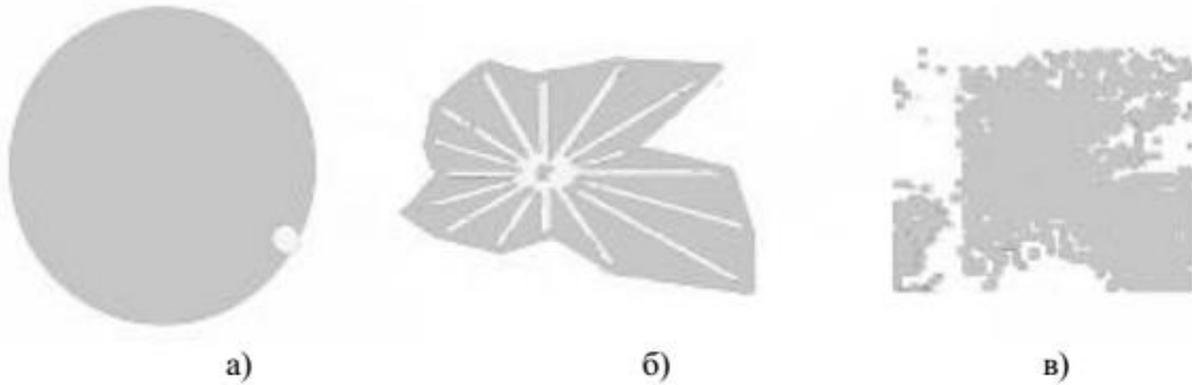


Рис. 6.3. Примеры конфигурации зон покрытия, полученных с помощью разных моделей распространения радиоволн

– модель распространения радиоволн в свободном пространстве, совершенно не учитывающая наличие земной поверхности

$$L_1 \approx 32,44 + 20 \lg R + 20 \lg F; \quad (6.29)$$

– модель распространения радиоволн в околоземном пространстве, учитывающая абсолютное экранирующее влияние идеальной сферической земной поверхности с эквивалентным радиусом $R_{зем}$:

$$L_2 = \begin{cases} L_1, R \leq R_{пр}; \\ \infty, R > R_{пр}, \end{cases} \quad (6.30)$$

где $R_{пр}$ – максимальная дальность прямой видимости:

$$R_{пр} = \sqrt{0,002R_{зем}} (\sqrt{H} + \sqrt{h}). \quad (6.31)$$

В условиях нормальной рефракции при коэффициенте рефракции $K_{реф} = 1,33$ эквивалентный радиус Земли равен $R_{зем} = 6400K_{реф} \approx 8500$ км. В этом случае формулу можно записать в виде:

$$R_{пр} = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h}); \quad (6.32)$$

– модели РРВ в приземном слое атмосферы, учитывающие статистические свойства неоднородности земной поверхности (включая наземные объекты)

$$L_3 = A + B \lg R, \quad (6.33)$$

где A и B зависят от типа земной поверхности, а также от частот F , МГц и высот антенн БС H , м и МС. Например, в модели Окамура–Хата для городских районов при $F = 150 \dots 1000$ МГц, $H = 30 \dots 200$ м, $h = 1 \dots 10$ м:

$$A = 69,55 + 26,16 \lg F - 13,82 \lg H - a(h); \quad (6.34)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \lg H, \quad (6.35)$$

где $a(h)$ – поправочный коэффициент для высоты антенны МС, равный, например, для небольших и средних городов величине

$$a(h) = (1,11 \lg F - 0,7)h - (1,56 \lg F - 0,8). \quad (6.36)$$

При известных коэффициентах усиления антенн БС $G_{\text{БС}}$ и МС $G_{\text{МС}}$ (во встречном направлении), а также мощности передатчика $P_{\text{прд}}$ и чувствительности приёмника $P_{\text{прм}}$ (с заданным запасом на замирания), можно определить максимальное допустимое затухание сигналов L_c :

$$L_c = P_{\text{прд}} + G_{\text{БС}} + G_{\text{МС}} - P_{\text{прм}}. \quad (6.37)$$

Задавая в качестве $P_{\text{прм}}$ минимально допустимый уровень сигнала и максимально допустимый уровень помех, можно определить минимальное допустимое затухание помех $L_{\text{п}}$.

Зная максимальное (минимальное) допустимое затухание сигналов L_c (помех $L_{\text{п}}$) путём несложных обратных преобразований формул (6.1), (6.2) или (6.4), несложно определить радиус зон покрытия R_c (зон ЭМС или помех $R_{\text{п}}$). Причём всегда при прочих равных условиях $R_c < R_{\text{п}}$.

Второй класс – модели распространения радиоволн, чувствительные не только к дальности R между БС и МС, но и к усреднённому виду земной поверхности между ними в виде среднего перепада высот Δh . Примером такой модели является модель, описанная в Рекомендации 370 МСЭ-Р.

Используя обратный пересчёт с помощью такой модели, можно для известного значения $\Delta h(\alpha)$ в направлении от БС к МС с азимутом α (при заданных остальных параметрах радиолинии, приведённых выше в моделях первого класса), более точно определить максимальную дальность связи $R(\alpha)$. Если определить значения $R(\alpha_i)$ при $i = 1 \dots N$ в N -направлениях, следующих с равномерным угловым шагом по азимуту $360/N$, град, то можно построить зону покрытия (или ЭМС) в виде N -угольного многогранника (рис. 6.3).

Третий класс – модели распространения радиоволн, чувствительные к реальному виду земной поверхности между БС и МС, с точностью, соответствующей способу получения и учёта исходных данных об этой поверхности (включая наземные объекты). Подобные достаточно точные модели, основанные на классических моделях дифракции, отражения и интерференции радиоволн, широко используются при расчётах радиорелейных линий связи.

Однако при расчёте зон покрытия сети подвижной связи вида точка–многоточка такие двуточечные радиорелейные модели оказываются слишком громоздкими, поскольку их приходится многократно применять для всех возможных мест размещения МС (при выбранном или заданном размещении БС), поэтому для ручных расчётов зон покрытия (или электромагнитной совместимости) сети подвижной радиосвязи модели третьего класса не применимы. Однако при использовании специальных компьютерных программ и цифровых карт местности (ЦКМ) или электронных карт (ЭК) земной поверхности (совместно образующих специализированные геоинформационные системы – ГИС), подобные модели позволяют получать результаты прогноза конфигурации зон покрытия и электромагнитной совместимости, достаточно близкие к реальности.

При использовании матричных электронных карт данная конфигурация зон покрытия электромагнитной совместимости имеет вид множества отмеченных (определённым цветом) пригодных для связи клеток, образующих сплошное покрытие поблизости от БС, чередующихся с неотмеченными (непригодными для связи) клетками при некотором удалении от БС и совсем исчезающих на значительном удалении от БС (см. рис. 6.3, в).

После построения зон покрытия многих БС с помощью перечисленных выше моделей при планировании сетей подвижной радиосвязи формируются карты границ зон обслуживания разных БС, представляющие собой множество элементарных площадок разрешения (ЭПР), помеченных условным номером той БС, от которой уровень сигнала превышает уровни сигналов от других БС. Именно карта границ при определённом регулярном размещении БС и однородных условиях РРВ имеет вид шестигранных сот (рис. 6.3, б).

Определив по карте границ величину радиуса зоны связи R_0 как минимальное расстояние до границы отдельной зоны обслуживания (соты) и определив максимальный радиус зоны ЭМС (помех) R_{Π} можно оценить минимально необходимое количество групп частот (размер кластера) N_F , необходимое для ССПС:

$$N_F = \left[\frac{(\rho + \gamma)^2}{3} \right], \quad (6.38)$$

где $\rho = \frac{R_{\Pi}}{R_0}$ – относительный радиус зоны помех; $\gamma \approx [-1, 1]$ – смещение относительного

расстояния до центра зоны обслуживания наиболее удалённой БС от радиуса зоны помех, учитывающее влияние разбиения зон доступа на секторы с помощью направленных антенн.

В частности, при использовании круговых антенн, $\gamma = 1$. При использовании секторных антенн допустимое расстояние до центра зоны доступа наиболее удалённой БС уменьшается, что отражается на величине $\gamma < 1$. В предельном случае (наиболее полно проявляющемся при использовании 6-секторных антенн) за счёт использования направленных антенн можно получить $\gamma = -1$. Используя обратный пересчёт с помощью формулы (6.38), можно оценить максимальный относительный радиус зоны помех, при котором допустимо использование того или иного количества групп частот.

В частности, при $N_F = 3, 4, 7$ (для круговых антенн) и $N_F = 9/3, 12/6$ (для трёх- и шестисекторных антенн), получим соответственно $\rho \approx 2; 2,46; 3,58$ ($\gamma = 1$); 3 ($\gamma = 0$); $3,45$ ($\gamma = -1$).

Таким образом, топологический аспект имеет важное значение для планирования (проектирования) зонных сетей подвижной радиосвязи и определяет особенности выбора мест размещения базовых станций, вычисления конкретной конфигурации (размеров) ячеек (зон доступа) и распределения частот с учётом окружающей земной поверхности, требований трафика подвижных абонентов и влияния мешающих РЭС.

Функциональный аспект концептуальной модели сотовых систем подвижной радиосвязи отражает особенности взаимодействия основных функциональных элементов сети:

- центркоммутации (Mobile Switches Center – MSC);
- базовые станции (БС) (Base Station – BS);
- подвижные (мобильные) станции (МС) или абонентские радиотелефонные аппараты (Mobile Terminal – MT).

Базовая станция сотовой системы связи обслуживает все подвижные станции (абонентские радиотелефонные аппараты) в пределах своей ячейки, при этом ресурс для установления соединения базовая станция предоставляет по требованию подвижных абонентов, как правило, на равноправной основе (метод транкинга). При перемещении абонента из одной ячейки в другую происходит передача его обслуживания от одной базовой станции к другой. Все базовые станции системы, в свою очередь, замыкаются на центр коммутации, с которого имеется выход во внешние сети, например, в ТФОП.

Простейшая система сотовой связи обслуживает определённую относительно небольшую территорию и содержит один центр коммутации, при котором имеются домашний (HLR – Home Local Register) и гостевой (VLR – Visit Local Register) регистры – базы данных о собственных абонентах и абонентах других систем. Сотовые системы подвижной радиосвязи высокой ёмкости включают несколько центров коммутации, один из которых условно можно назвать «ведущим». «Ведущим» является центр коммутации, при котором имеется домашний регистр. Нарастивание числа центров коммутации обеспечивает возможность эволюционного развития системы.

При перемещении абонента между ячейками одной системы происходит «эстафетная передача» обслуживания между базовыми станциями (handoff или handover) и установление соединения осуществляется через центр коммутации своей системы. При перемещении абонента на территорию другой системы, у которой имеется свой центр коммутации со своим домашним регистром, осуществляется функция автоматической передачи обслуживания абонента в другую систему – роуминг (от английского слова to roam – блуждать). Для автоматического роуминга, прежде всего, необходима аппаратурная совместимость систем (принадлежность их к одному и тому же стандарту сотовой связи), а также наличие соответствующих соглашений между компаниями-операторами разных сетей. Рассмотренная архитектура системы сотовой связи, в принципе, позволяет построить глобальную сеть, которая предусматривает персонализацию предоставления услуг связи (телекоммуникационного сервиса) с вызовом абонента не по месту, а по номеру.

Технический аспект концептуальной модели сотовой сети подвижной связи отражает особенности технической реализации её функциональных элементов.

Подвижная станция (мобильная станция или абонентский терминал) – оконечное устройство, обеспечивающее доступ подвижного абонента сети к телекоммуникационным ресурсам. Особенностью такого радиотелефона по отношению к обычным носимым радиостанциям является наличие логического блока, являющегося, по сути, микрокомпьютером со своей оперативной и постоянной памятью, осуществляющим управление работой подвижной станции. Для обеспечения конфиденциальности передачи информации в некоторых системах возможно использование режима шифрования. В этих случаях передатчик и приёмник подвижной станции включают соответственно блоки шифрования и дешифровки сообщений.

В радиотелефоне системы GSM предусмотрен специальный съёмный модуль идентификации абонента (Subscriber Identity Module – SIM). Радиотелефон

системы GSM включает также детектор речевой активности (Voice Activity Detector – VAD), который в интересах экономного расходования энергии источника питания (уменьшения средней мощности излучения), а также снижения уровня помех (неизбежно создаваемых для других станций при работающем передатчике) включает работу передатчика на излучение только на те интервалы времени, когда абонент говорит. В необходимых случаях к радиотелефону через специальные адаптеры с использованием соответствующих интерфейсов могут подключаться отдельные терминальные устройства (например, факсимильный аппарат, компьютер). Радиотелефоны цифровых ССПС, как правило, не имеют частотного дуплексера, что существенно упрощает и облегчает их конструкцию. Это оказывается возможным за счёт временного разделения приёма и передачи (TDD – Time Duplex Division).

Базовая станция – комплекс технических средств, предназначенный для соединения подвижного абонента с центром коммутации системы сотовой связи. Это самое общее понятие БС, но в различных системах сотовой связи существует ряд особенностей. Так, например, в стандарте GSM используется понятие «система базовой станции» (СБС), в которую входит контроллер базовой станции (КБС) и несколько, например, до шестнадцати, блоков приёмопередатчиков (БПП). Три блока приёмопередатчиков, расположенные в одном месте и замыкающиеся на общий контроллер базовой станции, могут обслуживать каждый свой 120-градусный азимутальный сектор в пределах ячейки (соты) или шесть БПП с одним КБС – шесть 60-градусных секторов. В стандарте D-AMPS в аналогичном случае могут использоваться соответственно три или шесть независимых базовых станций, каждая со своим контроллером, расположенных в одном месте и работающих каждая на свою секторную антенну; для обозначения такой «строеной» или «ушестерённой» конфигурации иногда употребляется термин «позиция ячейки» или «позиция соты» (Cell Site), хотя чаще наименование cell site является синонимом базовой станции.

Частовстречающейся особенностью базовой станции, которую следует отметить, является использование разнесённого приёма, для чего БС должна иметь две приёмные антенны. Кроме того, базовая станция может иметь раздельные антенны на передачу и на приём. Вторая особенность – наличие нескольких приёмников и такого же числа передатчиков, позволяющих вести одновременную работу на нескольких парах частот (дуплексных частотных каналах). Приёмники и передатчики имеют общие перестраиваемые опорные генераторы, обеспечивающие их согласованную перестройку при переходе с одного канала на другой; конкретное число M приёмопередатчиков зависит от конструкции и комплектации базовой станции. Для обеспечения одновременной работы M приёмников на одну приёмную и M передатчиков на одну передающую антенну между приёмной антенной и приёмниками устанавливается делитель мощности на M выходов, а между передатчиками и передающей антенной – сумматор мощности на M входов. Контроллер базовой станции, представляющий собой достаточно мощный и совершенный компьютер, обеспечивает управление работой станции, а также контроль работоспособности всех входящих в неё блоков и узлов. В состав контроллера входит блок сопряжения с ли-

нией связи, который осуществляет объединение информации, поступающей от базовых станций для передачи её по линии связи на центр коммутации, и разделение принимаемой от него информации. В качестве линии связи базовой станции с центром коммутации обычно используются радиорелейная или волоконно-оптическая линия.

Для обеспечения достаточной степени надёжности многие блоки и узлы базовой станции резервируются (дублируются), в состав станции включаются резервные источники бесперебойного питания (аккумуляторы). Поскольку аппаратура базовой станции потребляет значительную мощность, и соответственно выделяет заметное количество тепла, в ней предусматриваются специальные устройства охлаждения.

Центр коммутации является «мозговым центром» и одновременно диспетчерским пунктом сетей подвижной радиосвязи, который предназначен для перераспределения потоков между базовыми станциями и установления соединения между подвижными абонентами и абонентами телефонной сети общего пользования. В состав центра коммутации входят несколько процессоров (контроллеров), и он является типичным примером многопроцессорной системы. Собственно коммутатор осуществляет переключение потоков информации между соответствующими линиями связи. Он может, в частности, направить поток информации или от одной базовой станции к другой, или от базовой станции к стационарной сети связи, или, наоборот – от стационарной сети связи к нужной базовой станции. Коммутатор подключается к линиям связи через соответствующие контроллеры связи (концентраторы нагрузки), осуществляющие промежуточную обработку потоков информации. Общее управление работой центра коммутации и системы в целом проводится центральным контроллером, который имеет мощное математическое обеспечение.

Центр коммутации одновременно выполняет функции центра управления системой, поэтому в состав центра входят соответствующие автоматизированные рабочие места операторов. В частности, операторами вводятся данные об абонентах и условиях их обслуживания, исходные данные о режимах работы системы, в необходимых случаях оператор выдаёт требующиеся по ходу работы команды на перестройку параметров сети.

При составлении ЧТП ССПО необходимо чётко представлять структуру, состав и взаимодействие отдельных компонентов сотовой ССПО, к которым относятся (в порядке их укрупнения):

1) сота – это территория, обслуживаемая одной БС при всенаправленных антеннах. Каждой БС и соте присваивается свой набор частот – частотная группа и соседние БС работают на разных частотах, что позволяет исключить взаимные помехи. Территорию, в которой в данный момент перемещается абонент, называют зоной местоположения (ЗМ). Каждая БС поддерживает радиосвязь с абонентскими станциями, находящимися в данной соте;

2) кластер – совокупность соседних сот, между БС которых делят все частотные каналы системы и в которых используются разные частотные группы. Частотные группы внутри кластера не повторяются из-за опасности превышения уровня взаимных помех. Число сот, входящих в один кластер, называется его размерностью. Кластер является основой ЧТП;

3) зона обслуживания центра коммутации подвижной службы (ЦКПС) – основы сетевой подсистемы ССПО. ЦКПС управляет работой БС по стационарным линиям связи (кабельными, радиорелейными и др.), а все ЦКПС, входящие в состав сети, связаны между собой и имеют выход на транзитные коммутаторы стационарной телефонной сети общего пользования.

Территориальное деление в сотовой ССПО на зоны действия ЦКПС показано на рис. 6.4. Основной принцип построения сотовых ССПО – многократное повторное использование частот – способ организации связи, при котором одни и те же частоты многократно используются в разных зонах обслуживания. Реализация этого принципа обеспечивается повторением кластера на территории. Применение частотно-территориального планирования с повторным использованием частот позволяет эффективно использовать выделенные полосы частот, увеличить пропускную способность при ограниченном количестве частотных каналов и обслуживать большое число абонентов при ограниченном частотном ресурсе спектра.

При составлении ЧТП обслуживаемую территорию разделяют между базовыми станциями. При этом важно:

1) знать частотный план, присвоенный стандарту ССПО – распределение полос частот приёма $f_{0\text{прм}}$ и передачи $f_{0\text{прд}}$ между каналами;

2) составить частотно-территориальный план (ЧТП) как привязку частотного плана к конкретной территории. В ЧТП указывается:

2.1. Размерность кластера – C .

2.2. Число каналов в каждой частотной группе, присвоенной соте – $N_{\text{кБС}}$.

2.3. Количество БС в сети $N_{\text{БС}}$ и распределение частотных групп между сотами.

2.4. Номинальные значения частот каналов в такой группе – f_{0i} .

2.5. Расположение сот на территории.

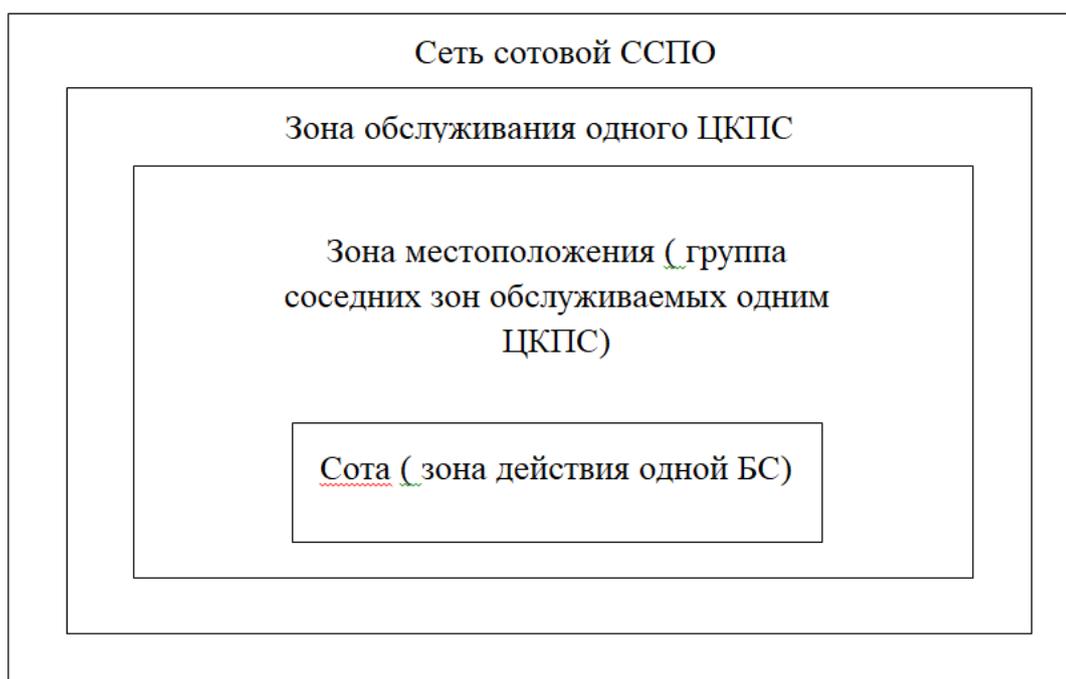


Рис. 6.4. Территориальное деление в сотовой ССПО

Для ССПО рассчитывается коэффициент повторного использования частот, определяемый соотношением

$$K_{\Pi} = N_{\text{БС}}/C. \quad (6.39)$$

Пример:

$$N_{\text{БС}} = 7; \quad C = 4; \quad K_{\Pi} = N_{\text{БС}}/C = 7/4 = 1,75.$$

На первом этапе составления ЧТП необходимо выбрать структуру сотовой ССПО. Она может быть двух типов:

1) регулярная или однородная, использующая всенаправленные антенны (рис. 6.5, а);

2) секторная на основе направленных антенн (рис. 6.5, б). В качестве направленных антенн на БС используются секторные антенны. Получили распространение секторные антенны с шириной главного лепестка ДНА (Θ), равной 60, 90 или 120°. На рисунке 6.5, б показаны соты с секторными антеннами при $\alpha = 120^\circ$. В этом случае сота делится на три сектора А, В, С. В каждом секторе устанавливается своя БС, причём в центре соты. Каждая БС работает на своей частоте. Частотные группы обозначены 1А, 1В,

При выборе структуры сотовой ССПО необходимо учитывать результаты расчётов, полученные в «Определение размерности кластера».

В однородной модели сети все БС имеют одинаковые значения эквивалентной изотропной излучаемой мощности (ЭИИМ), антенны с круговой ДНА и одинаковыми высотами. Энергетические параметры всех АС также одинаковы. Поляризация радиоволн и условия распространения на всей обслуживаемой территории приняты одинаковыми.

Сеть, построенная на базе регулярной сотовой структуры (рис. 6.6), представляет собой геометрически правильную сетку, в которой БС расположены на параллельных прямых АВ, CD, ... , в вершинах одинаковых равносторонних треугольников, называемых узлами (точки *a, c, b*).

Площади трёх соседних окружностей перекрываются. Соседние БС работают на разных частотах, минимальная размерность кластера $C = 3$. Такая структура имеет минимальную площадь перекрытия, равную 21% площади треугольника *acb*.

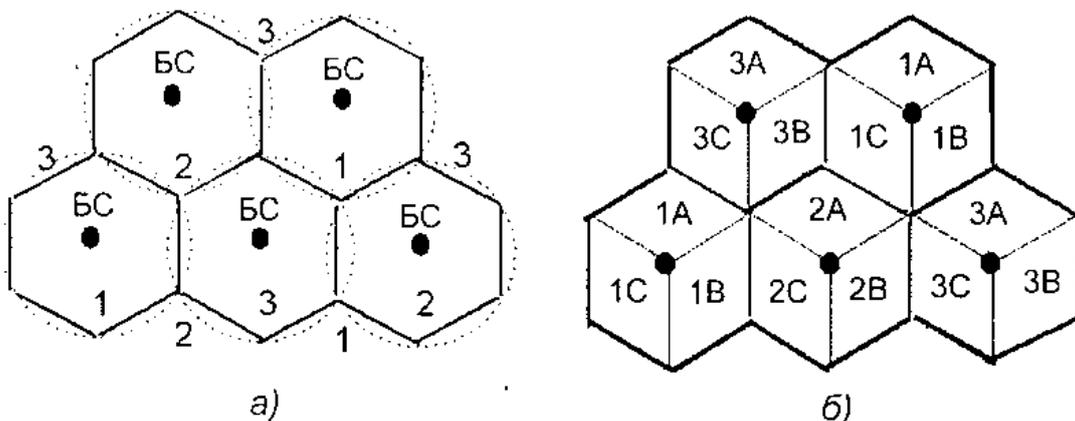


Рис. 6.5. Структуры сотовой ССПО

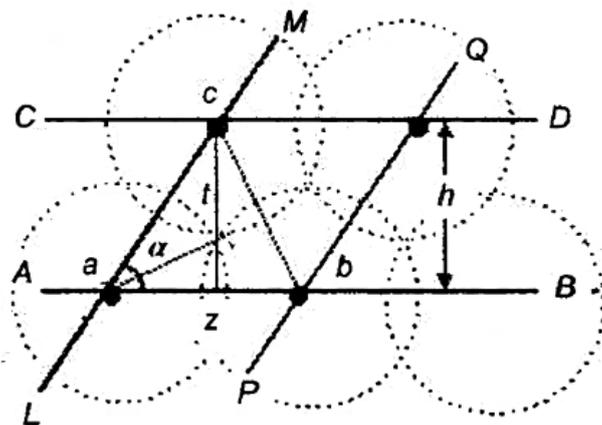


Рис. 6.6. Параметры регулярного территориального плана

Шестиугольник, полученный соединением точек пересечения окружностей, представляет собой соту. Такие соты обеспечивают сплошное покрытие территории без перекрытия зон.

Территория обслуживания БС – круг радиусом R_0 , величина которого определена в подразделе «Расчёт радиуса зоны обслуживания БС (радиуса соты)». Границы территорий трёх соседних БС пересекаются в одной точке t . В равностороннем треугольнике acb все углы равны ($\alpha = 60^\circ$) и геометрические построения позволяют определить следующие параметры треугольника acb :

$$at = R_0; \quad (6.40)$$

$$ac = cb = ab = 2R_0 \cos(\alpha/2) = R_0\sqrt{3}; \quad (6.41)$$

$$cz = ct + tz = R_0 + R_0 \sin(\alpha/2) = 1,5R_0. \quad (6.42)$$

Основные параметры территориального плана сети:

- расстояние между узлами (соседними БС)

$$d_0 = R_0\sqrt{3}; \quad (6.43)$$

- расстояние между параллельными прямыми

$$h = 1,5R_0; \quad (6.44)$$

- смещение узлов, расположенных на соседних параллельных прямых, относительно друг друга

$$\Delta d = \frac{d_0}{2} = \frac{R_0\sqrt{3}}{2}; \quad (6.45)$$

- расстояние от БС до границы соты (с учётом гексагональной формы ячейки)

$$r_1 = \Delta d. \quad (6.46)$$

Для выбора частот в соседних кластерах в сети применяют определённые правила, благодаря которым получают минимальные интерференционные помехи на совпадающих частотах. Эти правила поясним на примере кластера размерностью $C = 7$.

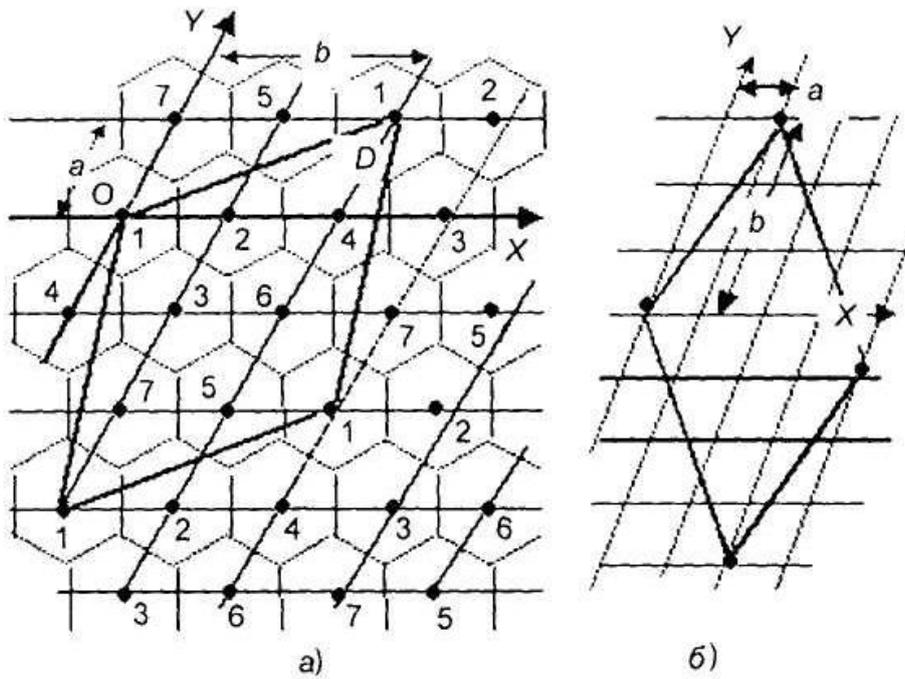


Рис. 6.7. Определение параметров регулярного территориального плана ССПО:
 $a - a = 1, b = 2; \bar{b} - a = 1, b = 3$

Узлы сети на рис. 6.7, a обозначены точками, а цифры означают номер соты в кластере. Соединив три ближайших узла (БС) с одинаковыми частотами, получим треугольник совмещённого канала, два смежных треугольника образуют ромб совмещённого канала (РСК), внутри которого нет базовых станций с одинаковыми частотами. Однородная сеть состоит из примыкающих друг к другу РСК с одинаковым распределением частот внутри РСК.

В косоугольной системе координат (X, Y) , угол между осями которой составляет 60° , а начало координат совмещено с одним из узлов сети, расстояние от начала координат до любого узла сети равно

$$d_{\text{БС}} = (X^2 + XY + Y^2)^{0,5}. \quad (6.47)$$

Каждая сторона РСК в однородной модели принадлежит двум смежным ромбам и на ней находится только два узла сети. Сторона ромба не может совпадать с осями X, Y . Следовательно, (6.47) определяет также и расстояние между соседними узлами сети.

В качестве единицы масштаба в этой системе координат принимают нормированное расстояние между узлами $D_0 = 1$, которое, с учётом соотношения (6.45), равно

$$D_0 = \frac{d_0}{d_0^*} = \frac{d_0}{R_0 \sqrt{3}} = 1, \quad (6.48)$$

где $d_0^* = R_0 \sqrt{3}$ – коэффициент пересчёта масштаба.

При использовании нормированного расстояния между узлами все расстояния в модели будут определяться целыми числами.

Число узлов в РСК представляет собой и равно

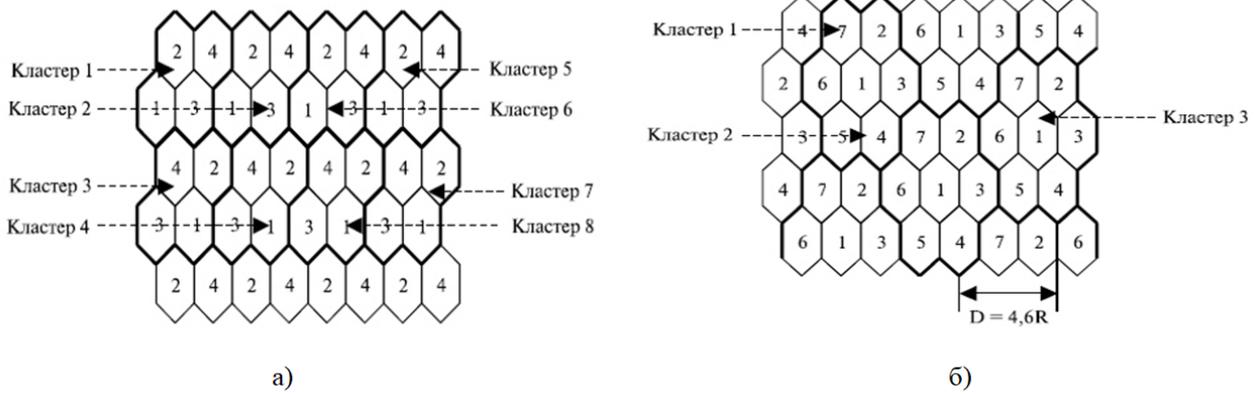


Рис. 6.8. Повторное использование частот в ЧТП ССС

$$C = a^2 + ab + b^2, \tag{6.49}$$

где a и b – целые положительные числа, которые не имеют общего делителя.

Из этой формулы видно, что кластер может содержать только определённое число сот. С учётом (6.49) и параметров РСК рассчитывается размерность кластера.

Пример 12.

На рисунке 6.7, *а*: $a = 1, b = 2, C = 7$.

На рисунке 6.7, *б*: $a = 1, b = 3, C = 13$.

С учётом (6.47) и (6.49) определяется расстояние между БС с одинаковыми частотами в соседних кластерах – расстояние повторного использования частот

$$d_{\text{кл}} = D_{\text{БС}} d_0^* = (a^2 + ab + b^2)^{0,5} R_0 \sqrt{3C} = qR_0, \tag{6.50}$$

где q – коэффициент снижения внутриканальных помех – характеризует степень взаимного влияния удалённых сот, в которых используются одни и те же частотные каналы (коэффициент электромагнитной совместимости (ЭМС) сети):

$$q = \sqrt{3C}. \tag{6.51}$$

Приведённое соотношение для $d_{\text{кл}}$ показывает, что чем меньше радиус ячейки R_0 , тем выше коэффициент повторяемости частот ($1/C$), а, следовательно, и эффективность использования выделенного диапазона частот.

Пример распределений частот при повторном использовании показан на рис. 6.8, *а* (4-элементный кластер) и *б* (7-элементный кластер).

Пример 13.

Методика построения территориального плана с использованием параметров модели кластера с параметрами: $a = 3, b = 2, C = 19$ (рис. 6.9).

1. Наносится сетка сот и выбирается центральная сота с номером 1.
2. Строится кластер вокруг этой соты с присвоением номеров по часовой стрелке. Первый пояс получает номера 2, 3, ..., 7, второй – номера 8, 9, ..., 19. Мы построили центральный кластер, его граница выделена жирной линией.
3. Определяется местоположение центральной соты 1 для соседних кластеров:

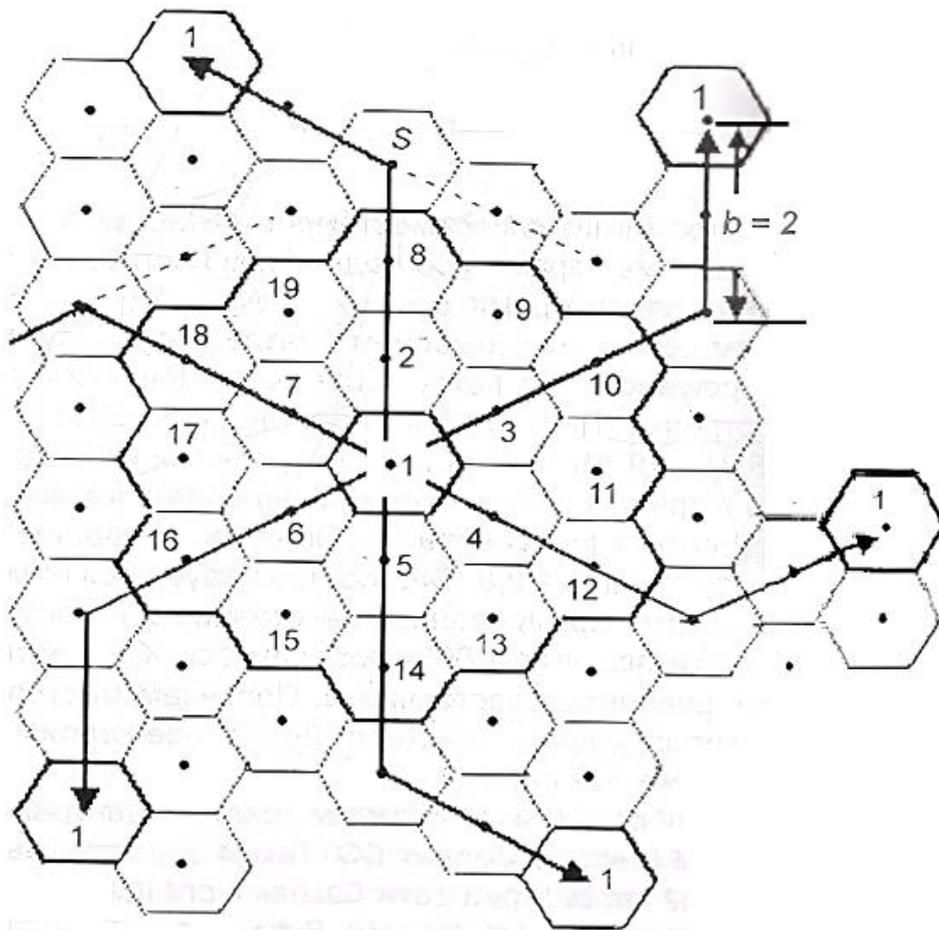


Рис. 6.9. Построение регулярного территориального плана ССПО

- проводится вертикальная линия через узлы 1, 2, 8. Она соответствует оси Y модели;
- на ней откладывается нормированное расстояние a и получается точка S ;
- из этой точки под углом 60° проводится ось X , на которой откладываем нормированное расстояние b – получается местоположение БС соты 1 для соседнего кластера;

– вокруг неё строим второй кластер точно так же, как первый.

4. Такие построения повторяют для каждой границы центральной соты 1 и получают точки местоположения шести исходных БС соседних кластеров.

5. После размещения БС сети с одинаковыми частотными группами (1, 2, 3, ..., 19) на территории задают в соответствии с этими номерами частотных групп номера частотных каналов из плана частот стандарта. По условиям ЭМС не рекомендуется в одной частотной группе использовать ближайшие соседние частоты плана.

Пример 14.

В качестве направленных антенн в данном случае на БС используются секторные антенны при $\alpha = 90^\circ$. В этом случае сота делится на четыре сектора: А, В, С, D. В каждом секторе устанавливается своя БС, причём в центре соты. Каждая БС работает на своей частоте. Частотные группы обозначены 1А, 1В, 1С, 1D и т.д.

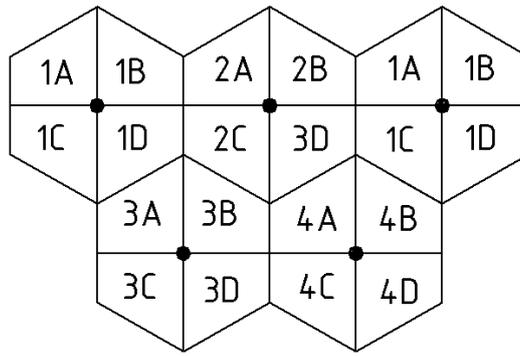


Рис. 6.10. Пример секторной структуры ССПО

6.1.2. СОСТАВЛЕНИЕ ЧТП ССПО

1. На карту наносится сетка сот и выбирается центральная сота. Ей присваивается номер 1. Так как в данном случае на БС используются секторные антенны при $\alpha = 90^\circ$, то сота делится на четыре сектора А, В, С и D.

2. Строится кластер вокруг центральной соты с присвоением номеров сотам по часовой стрелке. В данном случае кластер состоит из четырёх сот.

3. Для покрытия все зоны обслуживания, а именно 10 км^2 требуемое количество сот составляет семь (см. расчёт количества базовых станций). Так как в кластер входит четыре соты, необходимо добавить ещё три для покрытия сетью требуемой зоны. Базовым станциям дополнительных сот назначаем частотные каналы соты 2, соты 3 и 4 соответственно. Стоит отметить, что данные соты не оказывают влияния друг на друга, так как соблюдается условие расположения одинаковых сот на защитном расстоянии.

4. Необходимо назначить каждому сектору свои диапазоны частот для приёма и передачи. В стандарте DCS-1800 используется диапазоны частот на передачу – $1805,2 \dots 1879,8 \text{ МГц}$ и на приём – $1710,2 \dots 1784,8 \text{ МГц}$.

По результатам расчётов число частотных каналов, которые используются для обслуживания абонентов в одном секторе соты, составляет 23. Таким образом, составим таблицу распределения частот по секторам, каждый из которых содержит 23 частоты с шагом $0,2 \text{ МГц}$.

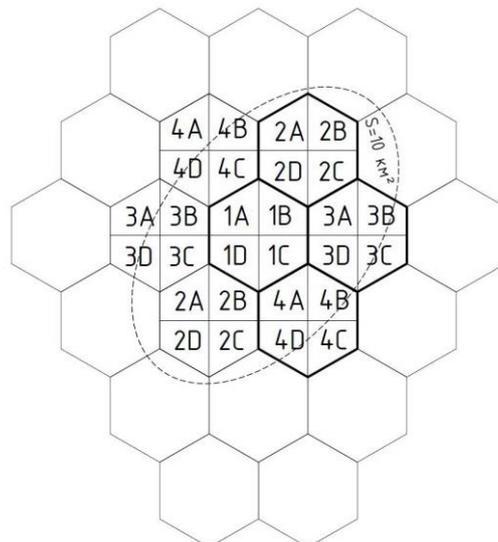


Рис. 6.11. Частотно-территориальный план ССПО

6.2. Распределение частот по секторам сот

Сектор	Приём, МГц	Передача, МГц
1A	1805,2...1809,6	1710,2...1784,8
1B	1809,8...1814,2	1714,8...1789,4
1C	1814,4...1818,8	1719,4...1794
1D	1819...1823,4	1724...1798,6
2A	1823,6...1828	1728,6...1803,2
2B	1828,2...1832,6	1733,2...1807,8
2C	1832,8...1837,2	1737,8...1812,4
2D	1837,4...1841,8	1742,4...1817
3A	1842...1846,4	1747...1821,6
3B	1846,6...1851	1751,6...1826,2
3C	1851,2...1855,6	1756,2...1830,8
3D	1855,8...1860,2	1760,8...1835,4
4A	1860,4...1864,8	1765,4...1840
4B	1865...1869,4	1770...1844,6
4C	1869,6...1874	1774,6...1849,2
4D	1874,2...1878,6	1779,2...1853,8

7. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторный практикум содержит пять работ, в которых рассматриваются вопросы в области инфокоммуникационных систем и сетей связи, связанные с определением диапазона частот, уровня сигнала активной базовой, нахождения координат базовых станции, с изучением свойств трафика в сети передачи данных и др. Изложенные в пособии работы содержат весь необходимый теоретический материал, подробные методики выполнения и обработки результатов исследований, индивидуальные задания для выполнения и контрольные вопросы для проверки уровня освоения теоретического и практического материала.

Лабораторная работа 1

УСИЛЕНИЕ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ И ИНТЕРНЕТА, ИЗМЕРЕНИЕ СИГНАЛА

Цель работы: рассмотреть основные параметры сотовой связи и определить диапазон частот выбранного оператора и стандарта связи, в котором он работает.

Методические указания к выполнению лабораторной работы

Мобильная телефонная связь (AMPS). В любой мобильной телефонной системе географический регион охвата делится на соты (отсюда иногда применяемое название – «сотовые телефоны»). В AMPS размер сот составляет обычно от 10 до 20 км; в цифровых системах соты ещё мельче. Каждая сота работает на своих частотах, не пересекающихся с соседними. Лежащая в основе телефонной системы AMPS идея разбиения территории на относительно небольшие ячейки и использования одних и тех же частот в различных (но не соседних) ячейках даёт этой системе значительно большие возможности по сравнению с более ранними системами. В то время как в системе IMTS на территории диаметром 100 км для каждого звонка требовалась своя частота, система AMTS в той же области могла состоять из ста десятикилометровых сот и поддерживать от 5 до 10 звонков на одной и той же частоте в сильно удалённых друг от друга ячейках. Кроме того, небольшие размеры сот означают меньшую мощность, требующуюся для передатчиков, а значит, и меньшую стоимость устройств [1].

Идея повторного использования частоты проиллюстрирована на рис. 7.1.1, а. Соты имеют форму, близкую к окружности, однако на модели их легче представить в виде шестиугольников. На рисунке 7.1.1, а все соты одного размера. Они объединены в группы по семь сот. Каждая буква соответствует определённому набору частот. Между ячейками с одинаковыми наборами частот располагается буфер примерно в две ячейки шириной, в котором данные частоты не используются – это обеспечивает хорошее разделение сигналов одинаковых частот и низкий уровень помех.

Главная задача заключается в том, чтобы найти подходящие возвышенности для размещения антенн базовых станций. Для решения этой проблемы многие операторы связи заключили договоры с Римско-католической церковью,

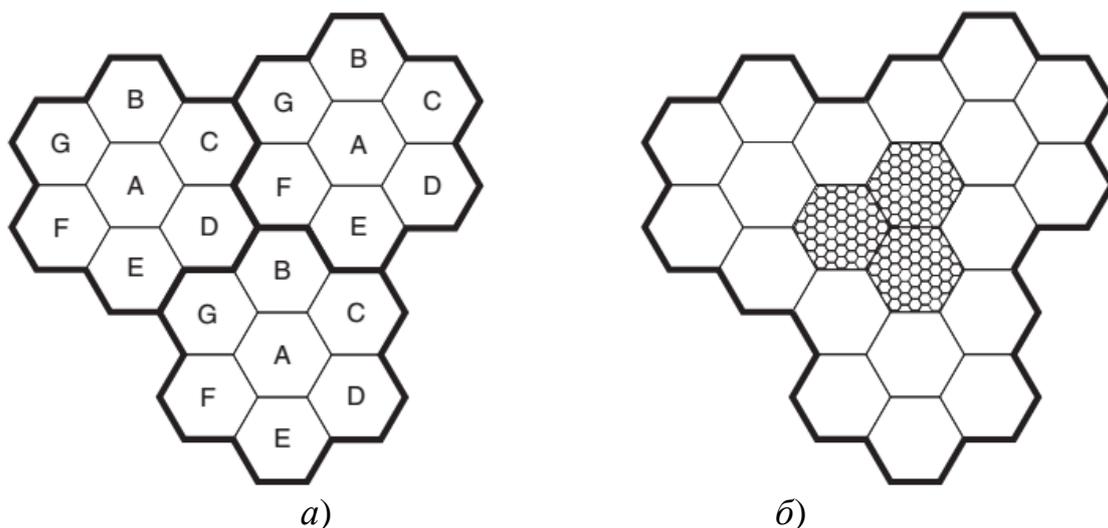


Рис. 7.1. Организация мобильной телефонной системы AMTS:
а – когда в соседних сотах используются разные частоты;
б – соты меньшего размера для увеличения числа пользователей

поскольку последней принадлежит существенное количество высоких строений в различных странах. Удобно и то, что все они находятся под единым управлением.

Если в каком-нибудь регионе количество пользователей вырастает настолько, что система переполняется, то мощность передатчиков уменьшается, а переполненные соты разбиваются на соты меньшего размера (микросоты), как показано на рис. 7.1.1, *б*. Телефонные компании иногда создают временные микросоты, используя переносные вышки со спутниковой связью во время больших спортивных соревнований, концертов и в других местах, где большое количество пользователей сотовой связи оказывается сконцентрировано в течение нескольких часов [1, 4 – 8].

В центре каждой ячейки располагается базовая станция, с которой связываются все телефоны, находящиеся в её зоне действия. Базовая станция состоит из компьютера и приёмника/передатчика, соединённого с антенной. В небольших системах все базовые станции соединены с одним устройством, называемым MTSO (Mobile Telephone Switching Office – коммутатор мобильных телефонов) или MSC (Mobile Switching Center – мобильный коммутационный центр). Большой системе может потребоваться несколько коммутаторов, которые соединяются с коммутатором второго уровня и т.д. Коммутаторы мобильных телефонов являются аналогами оконечных телефонных станций и в самом деле соединяются хотя бы с одним оконечным коммутатором обычной телефонной системы. Коммутаторы мобильных телефонов связываются с базовыми станциями, друг с другом и с коммутируемой телефонной сетью общего пользования, используя коммутацию пакетов [1, 3, 21].

В каждый момент времени мобильный телефон логически находится в зоне действия одной ячейки и управляется базовой станцией этой ячейки. Когда телефон физически покидает ячейку, его базовая станция замечает ослабление сигнала и опрашивает все окружающие станции, насколько хорошо они слышат сигнал этого телефона. Затем базовая станция передаёт управление данным те-

лефоном ячейке, получающей от него наиболее сильный сигнал, таким образом определяя ячейку, в которую переместился мобильный телефон. После этого телефон информируется о переходе в ведение новой БС, и если в этот момент ведётся разговор, телефону будет предложено переключиться на новый канал, поскольку в соседних сотах одинаковые частотные каналы не используются. Подобный процесс называется передачей (Handoff) и занимает около 300 мс. Назначение канала осуществляет коммутатор мобильных телефонов, являющийся центральным нервом системы. Базовые станции представляют собой всего лишь радиоретрансляторы [1].

Каналы. Система AMPS использует для разделения каналов частотное уплотнение (FDM). Она использует 832 дуплексных канала, каждый из которых состоит из пары симплексных каналов. Такую структуру называют FDD (Frequency Division Duplex – дуплексный режим с разделением частоты). 832 симплексных канала передачи располагаются в диапазоне от 824 до 849 МГц, и ещё 832 симплексных канала приёма – от 869 до 94 МГц. Ширина каждого канала составляет 30 кГц.

Все 832 канала можно разделить на четыре категории.

1. Управляющие каналы (от базовой станции к мобильному телефону) для управления системой.

2. Пейджинговые каналы (от базовой станции к мобильному телефону) для передачи сообщений мобильным пользователям.

3. Каналы доступа (двунаправленные) для установления соединения и назначения каналов.

4. Каналы данных (двунаправленные) для передачи голоса, факса или данных.

Для управления резервируется 21 канал. Поскольку одни и те же частоты не могут использоваться в соседних сотах, то число голосовых каналов, доступных в пределах одной ячейки, значительно меньше 832 – обычно около 45.

Управление вызовом. Каждый мобильный телефон в системе AMPS снабжается 32-разрядным порядковым номером и 10-значным телефонным номером, которые записываются в ПП У телефона. Телефонный номер состоит из 3-значного кода области, занимающего 10 бит, и 7-значного номера абонента, занимающего 24 бит. При включении телефон сканирует запрограммированный список из 21 управляющего канала, в котором он ищет наиболее сильный сигнал. Затем телефон передаёт в эфир свой 32-разрядный порядковый номер и 34-разрядный телефонный номер. Как и вся управляющая информация в системе AMPS, этот пакет посылается в цифровой форме, несколько раз, с применением помехоустойчивого кодирования, хотя сами голосовые каналы являются аналоговыми [1, 19, 20].

Когда базовая станция слышит этот сигнал, она передаёт сообщение коммутатору мобильного центра, который фиксирует появление нового пользователя, а также информирует «домашний» коммутатор абонента о его новом местоположении. Обычно мобильный телефон регистрируется примерно каждые 15 мин. Чтобы позвонить с мобильного телефона, его владелец включает телефон, вводит номер и нажимает клавишу SEND. При этом телефон посылает

набранный телефонный номер вместе со своими идентификаторами по каналу доступа. Если при этом происходит коллизия, то телефон повторяет попытку позже. Когда базовая станция получает запрос, она информирует об этом коммутатор. Если звонящий является клиентом оператора связи, которому принадлежит данный коммутатор (или одному из её партнеров), тогда коммутатор ищет для него свободный канал. Если такой канал находится, то номер этого канала посылается обратно по управляющему каналу. Затем мобильный телефон автоматически переключается на выбранный голосовой канал и ждёт, пока тот, кому звонят, ответит.

Входящие звонки обрабатываются иначе. Находящиеся в режиме ожидания телефоны постоянно прослушивают пейджинговый канал, ожидая адресованные им сообщения. Когда поступает звонок на мобильный телефон (с обычного или другого обильного телефона), то пакет посылается на «домашний» коммутатор вызываемого, которому должно быть известно текущее местонахождение абонента. Этот пакет пересылается на базовую станцию в его текущей ячейке, которая посылает по пейджинговому каналу сообщение типа: «Элемент 14, вы здесь?» При этом телефон, которому звонят, по управляющему каналу отвечает: «Да». Тогда базовая станция ему сообщает: «Элемент 14, вам звонок по каналу 3». После этого сотовый телефон переключается на канал 3 и начинает издавать звуковые сигналы. Информация может передаваться по проводам за счёт изменения какой-либо физической величины, например, напряжения или силы тока. Представив значение напряжения или силы тока в виде однозначной функции времени, $f(t)$, мы сможем смоделировать поведение сигнала и подвергнуть его математическому анализу [1, 16].

Ряды Фурье. В начале XIX столетия французский математик Жан-Батист Фурье доказал, что любая периодическая функция $g(t)$ с периодом T может быть разложена в ряд (возможно, бесконечный), состоящий из сумм синусов и косинусов:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(2\pi nft) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(2\pi nft), \quad (7.1.1)$$

где $f = 1/T$ – основная частота (гармоника); a_n, b_n – амплитуды синусов и косинусов n -й гармоники; c – константа.

Подобное разложение называется рядом Фурье. Разложенная в ряд Фурье функция может быть восстановлена по элементам этого ряда, т.е. если период T и амплитуды гармоник известны, то исходная функция может быть восстановлена с помощью суммы ряда (7.1.1).

Информационный сигнал, имеющий конечную длительность (все информационные сигналы имеют конечную длительность), может быть разложен в ряд Фурье, если представить, что весь сигнал бесконечно повторяется снова и снова (т.е. интервал от T до $2T$ полностью повторяет интервал от 0 до T и т.д.).

Амплитуды a_n могут быть вычислены для любой заданной функции $g(t)$, для этого нужно умножить левую и правую стороны выражения (7.1.1) на $\sin(2\pi kft)$, а затем проинтегрировать от 0 до T . Поскольку

$$\int_0^T \sin(2\pi kft) \sin(2\pi kft) dt = \begin{cases} 0 & \text{для } k \neq n; \\ T/2 & \text{для } k = n. \end{cases} \quad (7.1.2)$$

Остаётся только один член ряда: a_n . Ряд b_n исчезает полностью. Аналогично, умножая выражение (7.1.1) на $\cos(2\pi kft)$ и интегрируя по времени от 0 до T , мы можем вычислить значения b_n . Если проинтегрировать обе части выражения, не изменяя его, то можно получить значение константы c . Результаты этих действий будут следующими:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \sin(2\pi nft) dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) \cos(2\pi nft) dt; \quad c = \frac{2}{T} \int_0^T g(t) dt. \quad (7.1.3)$$

Например, в городе 4G-интернет обычно предоставляется на частоте 2600 МГц, и подавляющее большинство комплектов «для усиления 4G-интернета» рассчитано именно на эту частоту. А в местности, где расположен ваш загородный дом, оператор может предоставлять 4G-интернет на частоте 800 или 1800 МГц. Соответственно, в вашем загородном доме, комплект, предназначенный для работы на частоте 2600 МГц, будет бесполезен. Поэтому перед установлением систем усиления сотовой связи и мобильного интернета, необходимо выяснить поколение мобильной сети (2G, 3G или 4G), которую вы хотите усилить и диапазон частот, в котором работает сеть.

В России, для сотовых операторов выделено пять частотных диапазонов (800, 900, 1800, 2100 и 2600 МГц). В одном частотном диапазоне могут использоваться несколько поколений и стандартов связи. В таблице 7.1.1 приведены частотные диапазоны и стандарты сотовой связи, применяющиеся в России.

Из таблицы 7.1.1 следует, что каждое поколение сети может иметь несколько надстроек и подстандартов, а в одном частотном диапазоне могут применяться несколько стандартов и поколений сотовой связи.

7.1.1. Частотные диапазоны и стандарты сотовой связи, применяющиеся в России

Поколение сети	Частотный диапазон	Название стандарта
4G	800 МГц	LTE 800
	1800 МГц	LTE 1800
	2600 МГц	LTE 2600
3G	900 МГц	UMTS 900
	2100 МГц	UMTS 2100
2G	900 МГц	GSM 900, EGSM, GSM-E900
	1800 МГц	GSM 1800, DCS 1800

Ход работы

Сначала определим поколение сотовой сети, которую мы хотим усилить. В большинстве современных смартфонов технология передачи данных указывается рядом с уровнем мобильного сигнала оператора:

- 2G, GPRS (G), EDGE (E);
- 3G, UMTS, HSDPA (H), HSPA+ (H+);
- 4G, LTE (L).

Определить частоту сигнала можно самостоятельно с помощью смартфона. Замеры нужно проводить в различных типах подключения (2G, 3G, 4G). Чтобы измерить нужный стандарт, принудительно переведите смартфон в соответствующий режим сети. Для этого установите в настройках вашего смартфона интересующий вас режим сети. Современные смартфоны устроены таким образом, что всегда стремятся подключиться к наиболее современной и высокоскоростной сети. Например, при наличии слабого сигнала 4G, смартфон всё равно будет поддерживать связь с базовой станцией оператора в этом стандарте. В момент совершения вызова смартфон автоматически переключится на доступные ему стандарты 3G или 2G.

Переведите смартфон в нужный стандарт связи (смартфон не сразу переключается в нужный режим). Переключившись, необходимо подождать 1–2 мин, прежде чем приступать к замерам. Если вы не знаете, какой из присутствующих операторов подходит для решения ваших задач, произведите замеры с использованием SIM-карт разных операторов.

Замеры параметров сети можно произвести через скрытое сервисное меню смартфона или установив одно из приложений для проведения мобильного мониторинга и измерения сигнала, например «Сотовые вышки. Локатор», «Network Cell Info», «iWScan» и другие подобные приложения.

Данные, полученные в результате измерения сигнала сети, нужно сопоставить с табл. 7.1.2 размещённой ниже.

7.1.2. Частотный диапазон и соответствующий ему стандарт

Поколение сети	Частотный диапазон	Название стандарта
4G	800 МГц	LTE 800
	1800 МГц	LTE 1800
	2600 МГц	LTE 2600
3G	900 МГц	UMTS 900
	2100 МГц	UMTS 2100
2G	900 МГц	GSM 900, EGSM, GSM-E900
	1800 МГц	GSM 1800, DCS 1800

Приведём примеры проведения измерений, используя сервисное меню смартфона, приложения и табл. 7.1.2. Если в сервисном меню вашего смартфона вы видите обозначение WCDMA 2100 Band 1, это означает, что вы подключились к мобильной сети, работающей на частоте 2100 МГц. Диапазон значений абсолютного номера канала UARFCN лежит в диапазонах для DL 10 562... 10 838, а для UL 9612...9888 означает, что вы подключены к сети UMTS-2100 (3G). Оборудование для усиления данного сигнала должно быть стандарта 3G, работающее на частоте 2100 МГц.

7.1.3. Параметры сотовых сетей

Название стандарта связи	Диапазон значений ARFCN, UARFCN или EARFCN*		Частотный диапазон	Возможные обозначения сети в сервисном меню или приложениях	Символ на экране смартфона
GSM-900 2G	0...124 975...1023		900 МГц	GSM900, EGSM900, GSM- E900, Band 8	G, E, нет символа
GSM-1800 2G	512...885		1800 МГц	GSM1800, DCS, DCS1800, Band 3, Band 4	G, E, нет символа
UMTS-900 3G	DL	2937...3088	900 МГц	UMTS900, (900P), Band 8	G, H, H+
	UL	2712...2863			
UMTS-2100 3G	DL	10 562...10 838	2100 МГц	UMTS2100, WCDMA2100 Band 1	4G, H, H+
	UL	9612...9888			
LTE-800 4G	DL	6150...6449	800 МГц	LTE 800, 800 MHz Band 20	4G, LTE, L
	UL	24 150...24 449			
LTE-1800 4G	DL	1200...1949	1800 МГц	LTE 1800 Band 3	4G, LTE, L
	UL	19 200...19 949			
LTE-2600 FDD 4G	DL	2750...3449	2600 МГц	LTE 2600 Band 7	4G, LTE, L
	UL	20 750...21 449			
LTE-2600 TDD 4G**	37 750...38 249		2600 МГц	Band 38	4G, LTE, L

* – ARFCN – абсолютный номер канала. Позволяет по своему значению определить частотный диапазон и стандарт связи. В сетях UMTS и LTE для систем 3G и 4G, ARFCN заменён на UARFCN и EARFCN соответственно.

** – Приём и передача данных происходит в одном частотном диапазоне (технология TDD с временным разделением каналов DL/UL), что делает невозможным усиление сигнала активным усилителем (репитером).

Пример 1. Если в сервисном меню вашего смартфона вы видите обозначение WCDMA 2100 Band 1, это означает, что вы подключились к мобильной сети, работающей на частоте 2100 МГц. Диапазон значений абсолютного номера канала UARFCN лежит в диапазонах для DL 10562...10838, а для UL 9612...9888, означает, что вы подключены к сети UMTS-2100 (3G). Оборудование для усиления данного сигнала должно быть стандарта 3G работающее на частоте 2100 МГц.

Пример 2. Если в приложении «Network Cell Info» вы увидели обозначение Band 3, это значит, что ваш телефон работает с оператором на частоте 1800 МГц. Если на телефоне светятся символы 4G и LTE, ваше подключение LTE-1800 (4G). Следовательно, для усиления данной сети вам необходимо оборудование стандарта 4G, работающее на частоте 1800 МГц.

Пример 3. В приложении «Сотовые вышки. Локатор» отображается значение абсолютного номера канала ARFCN со значением в диапазоне 2750...3449, соответствующим частотному диапазону 2600 МГц. Помимо этого, в меню сеть отображается символами LTE и L2600. Сомнений нет, наше соединение стандарта 4G на частоте 2600 МГц.

Всегда определяйте частоту сигнала в той точке, где вы планируете устанавливать оборудование для усиления сигнала (внешнюю антенну, роутер, встроенный во внешнюю антенну и т.п.). Если ваш оператор сотовой связи использует несколько частотных диапазонов, ваш смартфон может использовать в разных местах разные стандарты подключения, например в помещении – один, а на улице – другой. Данная особенность связана с тем, что радиоволны с более низкой частотой лучше проникают через препятствия. При этом внутри помещения соединение на частоте 900 МГц может быть качественнее и устойчивее, чем на частоте 2100 МГц.

7.1.4. Параметры сотовых операторов, согласно заданию лабораторной работы

Номер	Оператор связи	Band	Частота	Обозначение частоты	Абсолютный радиочастотный номер канала ARFCN
1					
2					
...					
<i>n</i>					

Контрольные вопросы

1. Посчитайте коэффициенты Фурье для функции $f(t) = t$ ($0 \leq t \leq 1$).
2. Реальная форма сотовых ячеек редко бывает правильной как на рис. 7.1.1. Даже отдельные ячейки почти всегда имеют неправильную форму. Вы скажите свои предположения относительно причин этого явления. Как такая неправильная форма влияет на частоты, назначенные каждой ячейке?

3. Когда пользователь сотовой телефонной системы пересекает границу между сотами, в некоторых случаях разговор прерывается, несмотря на то, что все приёмники и передатчики функционируют нормально. Почему?

4. Какой системой является нефтепровод – симплексной, полудуплексной, дуплексной или вообще не вписывается в эту классификацию? Что можно сказать о реке или о соединении типа walkie-talkie?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ СИГНАЛА АКТИВНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ

Цель работы: определить точные значения уровня сигнала активной базовой станции для различных операторов сотовой связи: ОАО «Ростелеком», ОАО «Вымпелком», ОАО «Мегафон», ОАО «Мобильные ТелеСистемы», ЗАО «Вортек Мобайл», ООО «Т2Мобайл» и прочих с учётом различных стандартов поколений мобильной связи.

Методические указания

Радиосвязь, сотовая связь, телевидение, беспроводной Wi-Fi и 3G-интернет осуществляются при приёме и передаче радиоволн антеннами. Радиоволна – это электромагнитное излучение. Любая радиоволна характеризуется тремя основными параметрами: длиной волны, амплитудой и скоростью распространения. Свет и радиоволны распространяются с огромной скоростью: 300 тыс. км/с (т.е. луч света долетит от Земли до Луны меньше, чем за две секунды). Длина волны – это расстояние между двумя любыми её гребнями. Амплитуда – это «высота», на которую поднимается этот гребень. Чем больше амплитуда световой волны, тем ярче этот свет (иными словами, тем выше интенсивность волны). Зная длину волны и скорость её распространения, всегда можно вычислить частоту волны (это число гребней, образовавшихся за одну секунду). У радиоволны есть ещё одна характеристика – поляризация. Каждый видел радиоволны, и не раз, так как свет – это тоже радиоизлучение, но с очень малой длиной волны (соответственно, очень высокой частотой), в тысячу раз меньше миллиметра. Чтобы понять, как распространяются радиоволны, достаточно провести аналогию с распространением света:

- свет распространяется прямолинейно;
- если на пути луча света поставить большую преграду, то образуется тень;
- если на пути луча света поставить преграды, которые меньше длины волны или сравнимы с ней, то свет, претерпев некоторые изменения, пройдёт дальше;
- стекло ослабляет яркость света, иногда очень сильно;
- если на пути солнечного света поставить увеличительное стекло, то в его фокусе получится яркая ослепительная точка, которая может зажечь дерево.

Радиоволны имеют бóльшую длину волны, чем свет, но от этого законы их распространения не меняются. В технике используются радиоволны различных частот (длин волн):

- телевидение: 50...600 МГц (6...0,5 м);
- мобильная связь GSM900: 900 МГц (33 см);
- мобильная связь GSM1800: 1800 МГц (17 см);
- 3G-интернет: 2000 МГц (15 см);
- Wi-Fi: 2450 МГц (12 см) и 5750 МГц (5 см).

Радиоволны распространяются прямолинейно, так же, как и свет. Если на пути радиоволн поставить преграду размером порядка одного метра, то волна не ослабнет. Здесь можно провести аналогию с волнами на море: большая волна не ослабнет из-за находящегося в воде человека, а большой корабль не даст волнам пройти. Если же на пути радиоволны будет большое препятствие, например, многоэтажный дом, то оно значительно уменьшит сигнал, вплоть до полного его ослабления. Оконное стекло также ослабляет радиоволны. Спутниковая тарелка действует подобно увеличительному стеклу: собирает сигнал с большой площади и концентрирует в одной точке. И наоборот, сигнал исходит из одной точки, а тарелка собирает его и преобразует в узкий направленный пучок. Радиоволна, попадая на антенну, вызывает в ней электромагнитные колебания, и по проводящим частям антенны начинает течь электрический ток. Этот ток опускается по кабелю в приёмное устройство, где из него извлекается информация (звук, изображения, данные). И наоборот, если подать на антенну электрический ток определённой частоты, то антенна будет излучать в пространство радиоволны этой же частоты.

Любая антенна будет одинаково хорошо работать как на приём, так и на передачу сигнала в пределах своего рабочего диапазона частот. Поэтому для простоты в дальнейшем мы будем говорить только про приём или только про передачу.

Коэффициент усиления антенны характеризует способность антенны концентрировать сигнал в каком-либо определённом направлении. Приведём аналогию: представим, что в тёмной комнате у вас горит слабая 1 Вт лампочка. Вы сможете увидеть лишь контуры предметов в этой комнате, а дальние углы останутся тёмными. Теперь у вас в руках есть ещё небольшое зеркало. Оно отражает часть света от лампочки, и одна половина комнаты освещена в два раза лучше, но другая половина скрыта в тени от зеркала. В третьем случае поместим эту лампочку в отражатель от фонарика: получится пятно яркого света размером с ладонь. При помощи этого фонаря вы сможете осветить самый дальний угол комнаты. Но ничего, кроме этого пятна света вы не увидите. Таким образом, во всех случаях лампочка оставалась одна и та же. Мы использовали различные отражатели, меняя концентрацию светового луча в определённом направлении.

Абсолютно так же это происходит и у антенн. На самом деле антенны, не усиливают, а концентрируют сигнал в одном или нескольких направлениях, и термин «коэффициент усиления» не должен вводить вас в заблуждение. Коэффициент усиления измеряется в децибелах (дБ). Это логарифмическая величина и введена она для упрощения математических расчётов. Коэффициент усиления сравнивает мощность изотропного излучателя (одиноким лампочки без зеркал в примере) и мощность данной антенны. Для перевода отношения мощностей в децибелы необходимо воспользоваться табл. 7.2.1.

7.2.1. Перевод отношения мощностей в децибелы

дБ	Раз	дБ	Раз	дБ	Раз
0,0	1,000	0,9	1,109	9	2,82
0,1	1,012	1,0	1,122	10	3,16
0,2	1,023	2,0	1,260	11	3,55
0,3	1,035	3,0	1,410	12	3,98
0,4	1,047	4,0	1,580	13	4,47
0,5	1,059	5,0	1,780	14	5,01
0,6	1,072	6,0	2,000	15	5,62
0,7	1,084	7,0	2,240	16	6,31
0,8	1,096	8,0	2,510	17	7,08

Например, если одна антенна имеет $K_y = 10$ дБ, вторая имеет $K_y = 13$ дБ, то вторая антенна мощнее первой в два раза. Из двух антенн с одинаковым коэффициентом усиления и сходной конструкции меньшие размеры будет иметь антенна, предназначенная для приёма волн меньшей длины волны. Например, Wi-Fi-антенна усилением 20 дБ на частоту 5500 МГц имеет размер 18×18 см, а антенна усилением тоже 20 дБ, но на частоту 1800 МГц, имеет размеры 60×60 см.

Поляризация радиоволны – это явление направленного колебания векторов напряжённости электрического или магнитного полей. Поляризация может быть линейной (в направлении, перпендикулярном направлению распространения волны), круговой (правой либо левой, в зависимости от направления вращения вектора индукции) или эллиптической (промежуточный случай между круговой и линейной поляризациями). В наземной связи в основном используется только линейная поляризация. Поляризации волны соответствует грубая аналогия с волнами, бегущими по верёвке. Если жёстко закрепить один конец верёвки, а другой её конец начать перемещать в вертикальном направлении, то по верёвке побегут вертикальные волны, говорят, что они вертикально поляризованы. Если конец верёвки перемещать в горизонтальном направлении, то по верёвке побегут горизонтально поляризованные волны. Любая антенна с линейной поляризацией из всего спектра падающих на неё волн примет только те волны, поляризация которых совпадает с поляризацией антенны. На каждую антенну на заводе наносят направление её поляризации (обычно это стрелочка). При монтаже антенну можно установить так, чтобы стрелочка была расположена либо вертикально, либо горизонтально. Соответственно, антенна будет принимать либо вертикально, либо горизонтально поляризованные волны. Поэтому выбор поляризации – очень важный момент при построении беспровод-

ной сети. Неправильно установленная по поляризации антенна примет сигнал, но с очень значительными ослаблениями, иногда не приемлемыми для качественной связи.

Зоны Френеля. Учёт зон Френеля обязателен при установке антенн для усиления сотового сигнала, сигнала 3G, 4G, LTE, Wi-Fi. Зоны Френеля – это чередующиеся в пространстве максимумы и минимумы радиосигнала в точке его приёма, которые возникают из-за интерференции радиосигнала. Такая интерференция возникает:

- при отражении сигнала от зданий, поверхности земли;
- из-за переизлучения;
- из-за наличия перепадов влажности, пылевых облаков и т.д.

Представим идеальный случай: в пустом пространстве на удалении друг от друга есть источник сигнала (спутник № 1) и его приёмник (спутник № 2) (рис. 7.2.1).

Сигнал будет распространяться со скоростью света, без каких-либо искажений. Мы не заметим никаких изменений при перемещении приёмной антенны вокруг передающей. При удалении антенн друг от друга сигнал будет ожидаемо уменьшаться, без внезапных скачков мощности. Внесём в нашу идеальную картину одно изменение: добавим отражающую поверхность. Ситуация уже стала похожа на реальный мир, в котором, например, передающая и приёмная антенны – это базовая станция и антенна для 3G-модема, а поверхность – это земля или крыша другого дома.

Теперь в точке приёма есть два сигнала: прямой сигнал № 1, который аналогичен сигналу в первом идеальном случае (рис. 7.2.2). Отраженный сигнал № 2, который возник из-за отражения сигнала от поверхности земли. Этот сигнал будет слабее, чем сигнал № 1, но его существованием пренебречь нельзя. Пути,

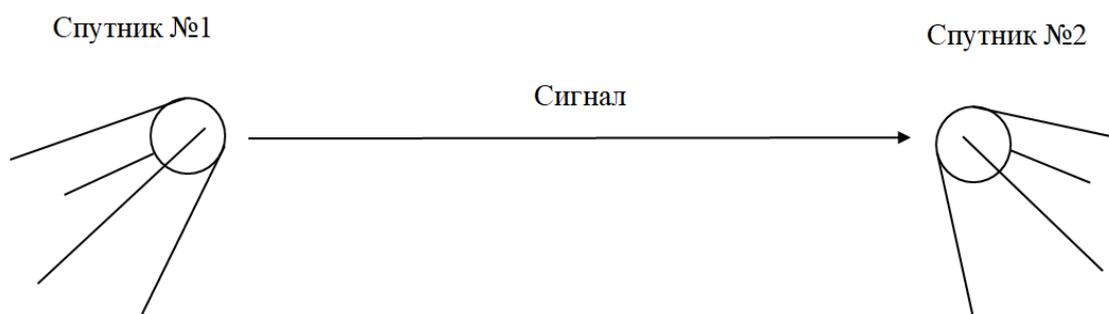


Рис. 7.2.1. Точка приёма с одним сигналом

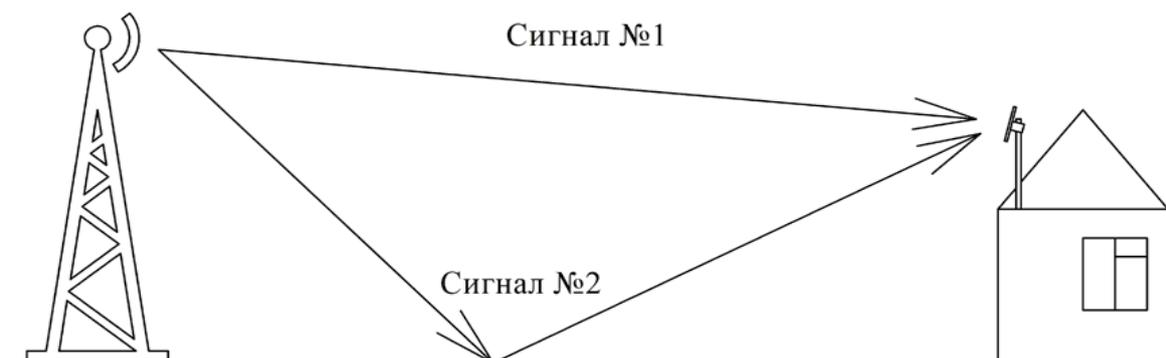


Рис. 7.2.2. Точка приёма с двумя сигналами

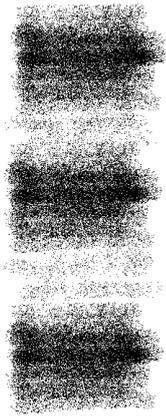


Рис. 7.2.3. Распределение мощности результирующего сигнала

по которым идут сигналы, отличаются друг от друга, и из-за этого сигналы придут в точку приёма с разными фазами. Если их фазы будут отличаться на π , то сигналы взаимно ослабят друг друга. В предельном случае результирующий сигнал будет довольно сильно ослаблен. Если же сигналы придут в фазе (т.е. в 2π), то они взаимно усилят друг друга, и результирующий сигнал будет заметно сильнее сигнала в первом идеальном случае. Если разность фаз займёт какое-то промежуточное значение,

то результирующий сигнал может как усиливаться, так и ослабевать. Именно это называется интерференцией. А образующиеся при этом периодические максимумы и минимумы – зонами Френеля.

Результат интерференции в каждом конкретном случае зависит от следующих параметров:

- высота передающей антенны над поверхностью;
- высота приёмной антенны над поверхностью;
- расстояние между передающей и приёмной антеннами;
- частота сигнала;
- коэффициент отражения поверхности.

Таким образом, при перемещении приёмной антенны вверх-вниз, сигнал будет то хорошим, то плохим. На рисунке 7.2.3 показан пример распределения мощности результирующего сигнала при перемещении приёмной антенны вверх-вниз.

Расстояние между максимумами и минимумами результирующего сигнала может быть несколько десятков сантиметров (например, при установке антенны для усиления 4G-сигнала). По этой причине любые сравнения работы двух антенн при их установке рядом друг с другом, но на разных высотах абсолютно бессмысленны, так как одна из антенн может находиться в точке, где результирующий сигнал максимален, а другая – где минимален.

На практике существует множество отражающих поверхностей: земля, крыши и стены домов, холмы и т.д. Следовательно, основной сигнал, идущий по прямой линии от передающей антенны к приёмной антенне, интерферирует с огромным количеством вторичных волн, отражающихся от этих поверхностей. Результат такой интерференции предсказать невозможно.

Ход работы

Выбор места установки абонентской антенны:

1. При выборе места установки абонентской антенны необходимо провести замеры во всех местах, пригодных для её установки. Каждый замер нужно делать в нескольких точках, чтобы понять распределение максимумов и минимумов результирующего сигнала. Кстати, их может и не быть или они могут быть слабо выражены.

2. Необходимо выбирать такое место установки абонентской антенны, чтобы на пути основного сигнала, идущего по прямой линии от передающей антенны к приёмной антенне, не было препятствий, а также вокруг этого пути не было отражающих поверхностей.

3. При установке антенны следует сдвинуть антенну вниз на некоторое расстояние (пару десятков сантиметров – полметра – метр) и замерить уровень сигнала. Потом следует сдвинуть антенну вверх на некоторое расстояние и замерить уровень сигнала там. Бывают случаи, что в зависимости от параметров местности интерференция будет такая, что сигнал будет отличаться в этих точках друг от друга на 20...30 дБ.

При выборе места для установки антенны следует обратить внимание, что пользовательскую антенну необходимо устанавливать в прямой видимости антенн базовой станции оператора 3G/4G. На пути от антенны до базовой станции не должно быть никаких высоких препятствий (здания, горы, холмы, лесопосадки и т.п.), мешающих распространению сигнала. Крупные объекты (высокие деревья, крыши домов), расположенные на расстоянии менее 1,5 м от антенны, могут отражать радиоволны, ухудшая качество связи. Если у вас остался излишек кабеля, используйте его на поднятие антенны вверх над землёй.

Если базовая станция оператора сотовой связи находится в прямой видимости, просто направьте антенну точно на неё и с высокой долей вероятности у вас всё заработает. За городом обычно установлены большие вышки операторов сотовой связи высотой в несколько десятков метров. В городах вместо вышек, занимающих много места, размещают базовые станции на крышах и стенах высоких зданий.

Если невозможно визуально определить расположение вышки или базовой станции 3G/4G оператора, необходимо отыскать место, в котором сигнал от базовой станции максимален.

RSRP – средний уровень сигнала, принимаемого с базовой станции оператора. Измеряется по логарифмической шкале в дБм (dBm) и отображается в виде отрицательных значений. Чем значение ближе к нулю, тем выше уровень принимаемого сигнала. Например, значение сигнала RSRP, равное – 65 dBm, намного лучше, чем значение – 97 dBm.

Для стандарта связи WCDMA (UMTS 2100) уровень сигнала, принимаемого с базовой станции, будет обозначен как RSCP.

SINR – отношение уровня полезного сигнала к уровню шума (соотношение сигнал/шум). Измеряется в дБ (dB). Чем выше данное значение, тем лучше качество сигнала. При значениях SINR ниже 0 скорость подключения будет очень низкой, так как это означает, что в принимаемом сигнале шума больше, чем полезной части.

Для стандарта связи WCDMA (UMTS 2100) соотношение сигнал/шум будет обозначено как Ec/Io.

RSRQ – качество принятых пилотных сигналов.

RSSI – показатель уровня сигнала, принимаемого приёмником модема. Измеряется по логарифмической шкале в дБм (dBm) и отображается в виде отрицательных значений. Более высокая мощность принимаемого сигнала соответствует меньшему отрицательному значению.

7.2.2. Оценка качества принимаемого сигнала

Показатели качества принимаемого сигнала	Значения параметров	
	RSSI, dBm	SINR (Ec/Io), dB
Отличные	-30...-50	30 и выше
Хорошие	-50...-70	от 20 до 30
Удовлетворительные	-70...-85	от 10 до 20
Плохие	-85...-110	менее 10

Рекомендуется проводить наведение антенны вдвоем (один человек перемещает антенну, второй отслеживает значения на мониторе). Медленно поворачивайте антенну в разных направлениях с шагом 3...5°. Показания значений на мониторе будут запаздывать относительно ваших действий. Повернув антенну, делайте паузу не менее 30...40 с и наблюдайте за изменением значений на мониторе.

Поворачивайте антенну до тех пор, пока не найдёте такое положение, в котором значения уровня принимаемого сигнала RSSI и отношение сигнал/шум SINR (Ec/Io) будут максимальны. Помимо числового значения, каждый параметр сигнала на экране, в зависимости от уровня приёма в том или ином стандарте, изменяет цвет от красного до зелёного (красный – плохие показатели приёма, зелёный – отличные). Оценить качество принимаемого сигнала можно, используя табл. 7.2.2.

Завершив наведение антенны, надёжно закрепите её в найденном положении, чтобы избежать смещения антенны и ухудшения качества связи.

При недостаточном качестве принимаемого сигнала, попробуйте перенести антенну в другое место или поднять выше. Возможно, для усиления слабого сигнала будет необходима антенна с бóльшим коэффициентом усиления, например, параболическая сетчатая, параболическая или офсетная тарелка.

Следует обратить внимание, что антенны с большим коэффициентом усиления имеют очень узкую диаграмму направленности, что предъявляет более высокие требования к точности их.

Разъём антенны выбрать N- и F-типа. Обычно в антеннах чаще всего используются N-разъёмы. На антенне обычно ставится разъём N-мама (female), кабель обжимается разъёмом N-папа (male). Это стандартные разъёмы, и если вы профессионально занимаетесь антеннами, то с N-разъёмами у вас вопросов не возникнет.

Если вам необходимо обжать кабель N-разъёмом всего один раз, то следующая информация будет для вас очень полезной.

1. Для разделки кабеля N-разъёмом потребуется специальный обжимной инструмент или паяльник, а также умение и, главное, желание ими пользоваться.

2. Для прокладки кабеля через стену вам придётся столкнуться с вот такой проблемой: даже если кабель уже обжат с обеих сторон N-разъёмами, то при диаметре кабеля в 7...8 мм, разъём имеет диаметр 20 мм. Для прокладки кабеля сквозь стену придётся либо сверлить отверстие диаметром 20 мм и просовывать кабель вместе с разъёмом, либо разбирать разъём, сверлить отверстие диаметром 8 мм, просовывать кабель сквозь стену и вновь собирать разъём. Что не всегда удобно.

3. N-разъём состоит из нескольких мелких частей. Можно очень легко что-нибудь потерять, особенно при монтаже антенны на крыше. А новый N-разъём не просто и быстро найти.

Преимущества F-разъёмов:

- легко и удобно монтировать;
- не нужны специальные инструменты, только нож;
- они очень дешёвые.
- их легко найти в продаже в случае необходимости;
- не влияют на качество работы антенн.

7.2.3. Определение параметров, согласно заданию

Стандарт сотовой связи	Уровень сигнала обслуживаемой вышки, dB	Уровень сигнала видимой вышки № 1	Уровень сигнала видимой вышки № 2

Контрольные вопросы

1. По бесшумному каналу с полосой пропускания 4 кГц каждую 1 мс передаются отсчёты сигнала. Какова будет максимальная скорость передачи данных? Как изменится максимальная скорость передачи данных, если канал будет иметь шум с отношением сигнал/шум 30 дБ?

2. Какова максимально допустимая скорость передачи данных при передаче двоичного сигнала по каналу с полосой пропускания 3 кГц и отношением сигнал–шум 20 дБ.

3. Ширина телевизионных каналов составляет 6 МГц. Сколько бит в секунду может быть передано по такому каналу при использовании четырехуровневых цифровых сигналов? Предполагается, что шума в канале нет.

Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ АКТИВНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ПОДВИЖНОГО АБОНЕНТА

Цель работы: определить координаты базовой станции по LAC и CID.

Методические указания

Электромагнитный спектр. Движение электронов порождает электромагнитные волны, которые могут распространяться в пространстве (даже в ва-

кууме). Число электромагнитных колебаний в секунду называется частотой f и измеряется в Гц. Расстояние между двумя последовательными максимумами (или минимумами) называется длиной волны. Эта величина традиционно обозначается греческой буквой λ . Если в электрическую цепь включить антенну подходящего размера, то электромагнитные волны можно с успехом принимать приёмником на некотором расстоянии. На этом принципе основаны все беспроводные системы связи. В вакууме все электромагнитные волны распространяются с одной и той же скоростью, независимо от их частоты. Эта скорость называется скоростью света, c . Её величина приблизительно равна 3×10^8 м/с, или около одного фута (30 см) за нс. В меди или стекле скорость света составляет примерно $2/3$ от этой величины, кроме того, слегка зависит от частоты. Скорость света современная наука считает верхним пределом скоростей. Быстрее не может двигаться никакой объект или сигнал.

Величины f , λ и c (в вакууме) связаны фундаментальным соотношением:

$$\lambda f = c. \quad (7.3.1)$$

Поскольку c является константой, то, зная f , мы можем определить λ , и наоборот. Существует мнемоническое правило, которое гласит, что $\lambda f \approx 300$, если λ измеряется в м, а f – в МГц. Например, волны с частотой 100 МГц имеют длину волны около 3 м, 1000 МГц соответствует 0,3 м, а длине волны 0,1 м соответствует частота 3000 МГц.

На рисунке 7.3.1 изображён электромагнитный спектр. Радио, микроволновый, инфракрасный диапазоны, а также видимый свет могут быть использованы для передачи информации с помощью амплитудной, частотной или фазовой модуляции волн. Ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения были бы даже лучше благодаря их высоким частотам, однако их сложно генерировать и модулировать, они плохо проходят сквозь здания и, кроме того, они опасны для всего живого. Диапазоны, перечисленные в нижней части рис. 7.3.1, представляют собой официальные названия ИТУ (International Telecommunication Union, международное телекоммуникационное сообщество), основанные на длинах волн. Так, например, низкочастотный диапазон (LF, Low Frequency) охватывает длины волн от 1 до 10 км (что приблизительно соответствует диапазону частот от 30 до 300 кГц). Сокращения LF, MF и HF обозначают Low Frequency (низкая частота), Medium Frequency (средняя частота) и High Frequency (высокая частота) соответственно. Очевидно, при назначении диапазонам названий никто не предполагал, что будут использоваться частоты выше 10 МГц, поэтому более высокие диапазоны получили названия VHF (Very High Frequency – очень высокая частота), UHF (ultraHigh Frequency – ультравысокая частота, УВЧ), SHF (Super High Frequency – сверхвысокая частота, СВЧ), EHF (Extremely High Frequency – чрезвычайно высокая частота) и THF (Tremendously High Frequency – ужасно высокая частота). Выше последнего диапазона имена пока не придуманы, но если следовать традиции, появятся диапазоны Невероятно (Incredibly), Поразительно (Astonishingly) и Чудовищно (Prodigiously) высоких частот (ITF, ATF и PTF).

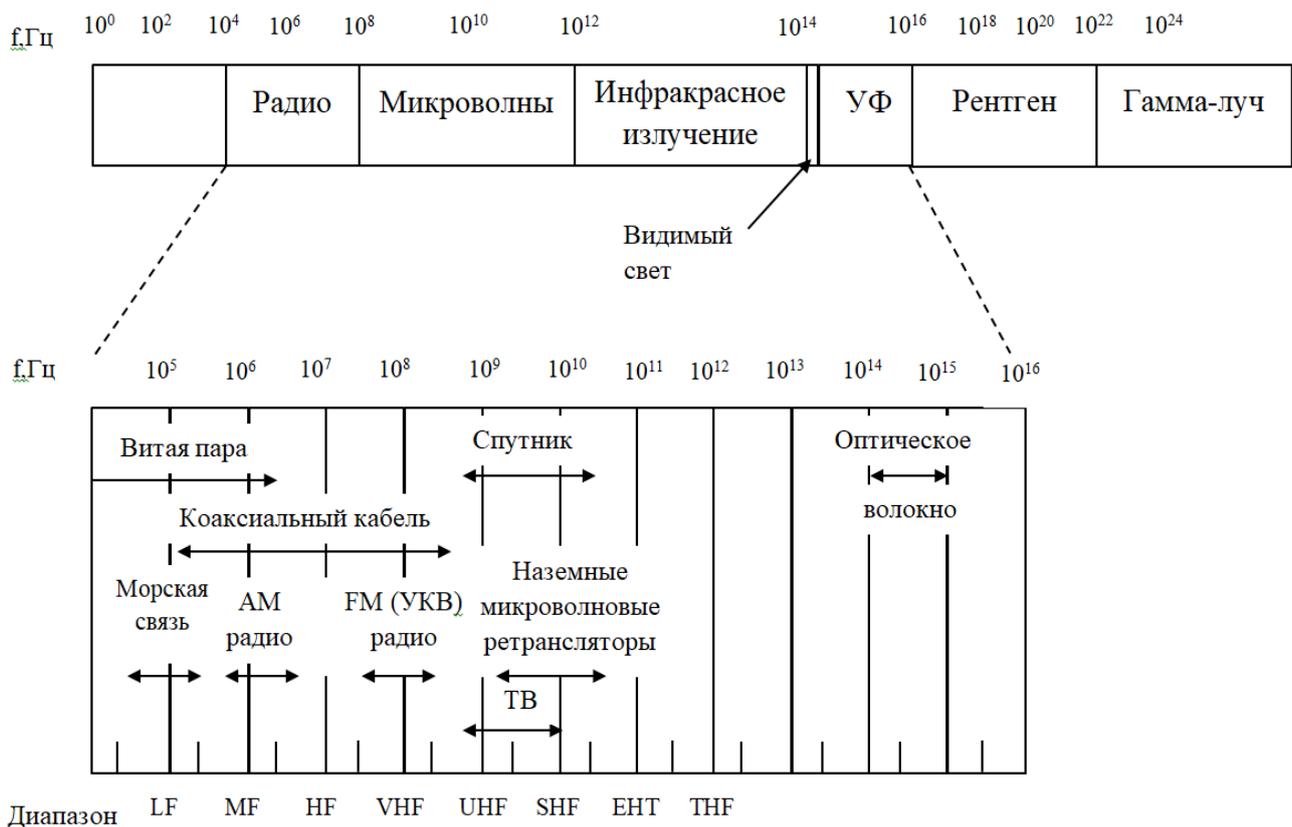


Рис. 7.3.1. Электромагнитный спектр и его применение в связи

Большинство систем связи используют относительно узкие полосы частот (т.е. $\Delta f/f \ll 1$). Сигналы концентрируются в узкой полосе для эффективного использования спектра и достижения хорошей скорости передачи данных при достаточно мощной передаче. Однако иногда используются и широкие полосы. При этом возможны три варианта. Когда применяется расширенный спектр с перестройкой частоты, то передатчик изменяет частоту работы сотни раз в секунду. Этот метод очень популярен в военных системах связи, потому что такой сигнал тяжело перехватить и почти невозможно заглушить. Он также обладает хорошей защищённостью от многолучевого затухания и сосредоточенных помех, поскольку приёмник не задерживается на искаженной частоте надолго, и разговор не прерывается. Устойчивость и надёжность особенно важны в наиболее заполненных частях спектра, например в полосах ISM (Industrial, Scientific and Medical Band, промышленный, научный и медицинский диапазоны), которые мы вкратце рассмотрим. В коммерческих системах данная техника также применяется, например, в Bluetooth и старых версиях 802.11. Метод, использующий широкую полосу частот, называется расширенным спектром с прямой последовательностью. Кодовая последовательность применяется для распределения сигнала данных по более широкой полосе частот. Этот метод широко используется в коммерческих системах, так как позволяет эффективно передавать несколько сигналов внутри одной полосы частот. Сигналам можно присваивать разные коды; этот метод называется CDMA (Code Division Multiple Access – кодовое разделение каналов с множественным доступом). На рисунке 7.3.2 показано, как данный метод отличается от метода с перестройкой частоты.

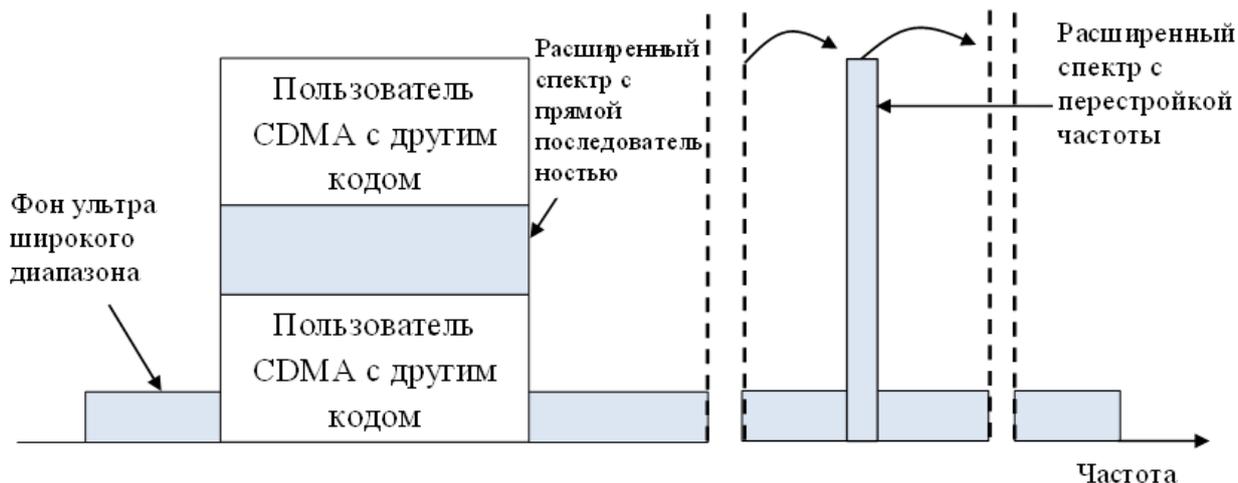


Рис. 7.3.2. Расширенный спектр и передача данных по сверхширокой полосе пропускания

Кстати, он лежит в основе мобильных телефонных сетей 3G, а также используется в системах GPS (Global Positioning System – глобальная система определения координат). Даже без назначения кодов расширенный спектр с прямой последовательностью, так же как и расширенный спектр с перестройкой частоты, устойчив к сосредоточенным помехам и многолучевому замиранию, так как теряется при этом только часть сигнала. Именно поэтому он применяется в старых беспроводных сетях 802.11b.

Третий метод передачи данных в широкой полосе называется UWB-коммуникацией или коммуникацией в ультрашироком диапазоне. Для пересылки информации отправляется последовательность коротких импульсов, изменяющих своё положение. Большое количество коротких импульсов формирует сигнал, распределённый по очень широкой полосе частот. Полоса пропускания UWB-коммуникации составляет минимум 500 МГц или минимум 20% от значения центральной частоты соответствующей полосы частот. Рисунок 7.3.2 также иллюстрирует UWB-коммуникацию. С такой полосой пропускания возможна передача данных на очень высоких скоростях. А распределение по широкому диапазону частот позволяет сигналу выдерживать значительное количество относительно сильных помех со стороны других узкополосных сигналов. Так же важно, что при передаче данных на короткое расстояние UWB-передатчик излучает на каждой конкретной частоте сигнал малой мощности, он не создаёт серьёзных помех для этих узкополосных радиосигналов. Можно сказать, что по отношению к другим сигналам UWB-передача остаётся фоновой. Благодаря такому мирному существованию на свет появился новый вид сетей – PAN, Personal Area Network. Скорость передачи данных в персональной сети – до 1 Гбит/с. Нельзя сказать, однако, что это стало несомненным коммерческим успехом. UWB-коммуникацию можно применять для получения изображений объектов, находящихся за твёрдой преградой (земля, стены, тела людей или животных), а также в системах точного определения местоположения. Теперь рассмотрим использование различных частей электромагнитного спектра, показанного на рис. 7.3.1, начиная с радиосвязи. Будем предполагать, что передача данных осуществляется в узкой полосе частот.

Радиосвязь. Радиоволны просто сгенерировать, они могут преодолевать большие расстояния, проходить сквозь стены и огибать здания, поэтому их область применения довольно широка. Радиосвязь устанавливается как в помещениях, так и вне зданий. Кроме того, радиоволны могут распространяться одновременно во всех направлениях, поэтому для низких частот не требуется тщательного наведения антенн передатчика и приёмника. В некоторых случаях такое свойство радиоволн является удобным, но иногда оно нежелательно. Свойства радиоволн зависят от частоты. При работе на низких частотах радиоволны хорошо проходят сквозь препятствия, однако мощность сигнала в воздухе резко падает по мере удаления от передатчика. Соотношение мощности и удалённости от источника выражается примерно так: $1/r^2$. Энергия сигнала распределяется по большой поверхности более тонким слоем. Такое ослабление называется потерей на траектории. На высоких частотах радиоволны вообще имеют тенденцию распространяться исключительно по прямой линии и отражаться от препятствий. Потеря на траектории снижает мощность, однако полученный сигнал также сильно может зависеть от отражений. Высокочастотные радиоволны намного сильнее низкочастотных поглощаются дождём и другими препятствиями. Радиосигналы любых частот подвержены помехам со стороны двигателей с искрящими щётками и другого электрического оборудования. В диапазонах VLF, LF и MF радиоволны огибают поверхность земли, как показано на рис. 7.3.3, а. Эти волны можно поймать радиоприёмником на расстоянии около 1000 км, если используются низкие частоты, и на несколько меньших расстояниях, если частоты повыше. Радиовещание с амплитудной модуляцией (АМ) использует диапазон средних волн (MF), радиоволны этих диапазонов легко проникают сквозь здания, вследствие чего переносные радиоприёмники работают и в помещениях. Основным препятствием для использования этих диапазонов для передачи данных является их относительно низкая пропускная способность (выражение (7.3.1) $\lambda f = c$). Радиоволны диапазонов HF и VHF поглощаются Землёй. Однако те из них, которые доходят до ионосферы, представляющей собой слой заряженных частиц, расположенный на высоте от 100 до 500 км, отражаются ею и посылаются обратно к поверхности Земли, как показано на рис. 7.3.3, б. При определённых атмосферных условиях сигнал может отразиться несколько раз. Радиохобби используют такие диапазоны частот для дальней связи. Военные также осуществляют связь в диапазонах HF и VHF.

Расположение базовых станций различных операторов – несекретная, но и неоткрытая информация. Информации о местоположении базовых станций в свободном доступе нет, так как она является коммерческой тайной. С помощью открытой базы данных возможно узнать примерное местоположение сектора, т.е. усреднённые координаты места, в котором наибольшее количество абонентов регистрировалось на искомом секторе.

Вокруг этого места с отметкой базовая станция находились люди, мобильные телефоны которых регистрировались в секторе с параметрами MCC, MNC, LAC и CellID. Следовательно, отображается зона действия базовой станции, что для геолокации, определения местонахождения абонентов по мобильному телефону, даже лучше, так как местоположение самой базовой станции не так много говорит о том, где находятся абоненты, её использующие.

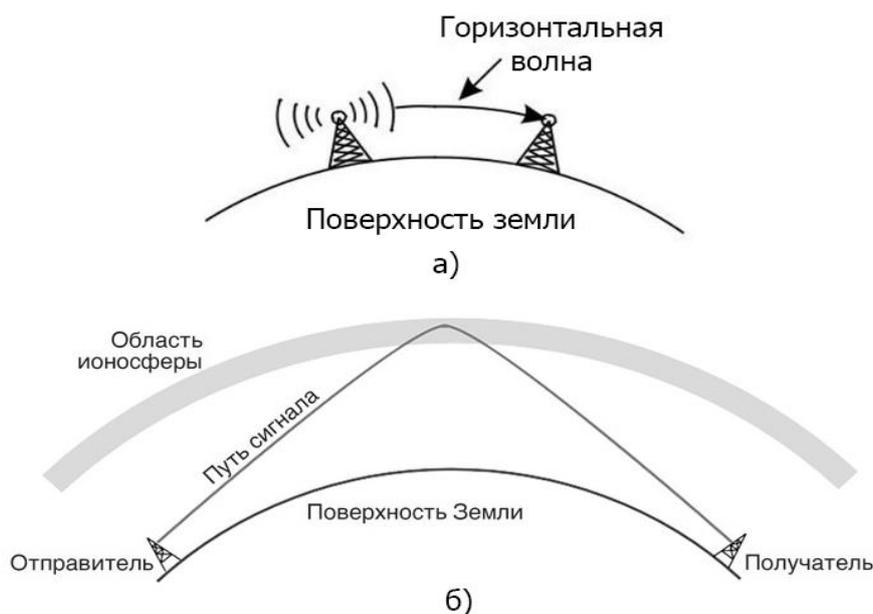


Рис. 7.3.3. Волны диапазонов VLF, LF и MF огибают неровности поверхности земли (а); волны диапазона HF отражаются от ионосферы (б)

Зоны действия базовых станций варьируются от пары десятков метров внутри торговых центров до десятков километров в малонаселённой сельской местности. Поиск координат базовых станций проводится в базах данных Google и Yandex, которые предоставили такую возможность. Следует отметить, что в результате поиска мы получаем не точное местоположения вышки, а приблизительное. Это то местоположение, в котором регистрировалось наибольшее количество абонентов, передавших информацию о своём местоположении на серверы Google и Yandex. Наиболее точно местоположение по LAC и CID определяется при использовании функции усреднения, при которой вычисляются координаты всех секторов (CellID) одной базовой станции, а затем вычисляется усреднённое значение.

7.3.1. Параметры для локализации базовой станции

MCC	MNC	Network	Operator or brand name	Status
250	1	Mobile TeleSystems	MTS (МТС)	Operational
250	2	MegaFon OJSC	MegaFon (Мегафон)	Operational
250	3	Nizhegorodskaya Cellular Communications	NCC	Operational
250	4	Sibchallenge		Inactive
250	5	Yeniseytelecom	ЕТК	Operational
250	6	CJSC Saratov System of Cellular Communications	Skylink (Скайлинк)	Operational

Продолжение табл. 7.3.1

MCC	MNC	Network	Operator or brand name	Status
250	7	Zao SMARTS	SMARTS	Operational
250	9	Khabarovsky Cellular Phone	Skylink (Скайлинк)	Operational
250	10	Don Telecom	DTC	Inactive
250	11	Yota		Operational
250	12	Baykal Westcom / Akos	Baykal (Байкал)	Operational
250	13	Kuban GSM	KUGSM	Inactive
250	15	SMARTS Ufa, SMARTS Uljanovsk	SMARTS	Operational
250	16	New Telephone Company	NTC	Operational
250	17	JSC Uralsvyazinform	Utel	Operational
250	19	Indigo		Inactive
250	20	Tele2	Tele2 (Теле2)	Operational
250	23	Mobicom – Novosibirsk	Mobicom	Inactive
250	28	Beeline	Beeline (Билайн)	Inactive
250	32	K-Telecom	Win Mobile	Operational
250	35	MOTIV	MOTIV	Operational
250	37	ZAO Kodotel	ZAO Kodotel	Operational
250	38	Tambov GSM	Tambov GSM	Operational
250	39	Uralsvyazinform	Utel	Operational
250	44	Stuvtelesot		Inactive
250	50	Mobile TeleSystems	MTS (МТС)	Operational
250	92	MTS – Primtelefon		Inactive
250	93	Telecom XXI		Inactive
250	99	OJSC VimpelCom	Beeline (Билайн)	Operational

Ход работы

Данные берутся с нетмонитора. Нетмонитор – это специальное приложение для мобильных телефонов или других устройств, которое позволяет узнать инженерные параметры мобильной сети. Кроме того, многие современные GPS трекеры в условиях плохого приёма спутников могут отсылать хозяину не координаты, а параметры базовой станции (MCC, MNC, LAC, Cellid), за которую они цепляются. Cellidfinder поможет быстро перевести эти параметры в приблизительное местоположение базовой станции. Для поиска местоположения базовых станций программа Opensignal.

Для телефонов с операционной системой Android использовать комбинацию `*##*4636##*` для запуска инженерного меню, в котором также будет вся необходимая информация.

Для владельцев iPhone посмотреть нужные параметры в инженерном меню, попасть в которое можно, набрав комбинацию `*3001#12345#*`.

После получения необходимых данных из инженерного меню переводим коды в систему географических координат. Сделать это можно при помощи таких сервисов, как OpenCellID <https://cellidfinder.com/> или XINIT <https://xinit.ru/bs/250-20-13800-23>

Вводим эти параметры в форму поиска на главной странице. Так как LAC и CID могут выдаваться нетмонитором как в десятичном, так и в шестнадцатеричном виде, то форма поиска имеет автозаполнение для LAC и CID во втором виде. Выбираем «Данные Google», «Данные Yandex» и, если необходима высокая точность, «Усреднение». Нажимаем кнопку «Найти БС».

Усредненное значение:

координаты: 52.711214656, 41.44144103454

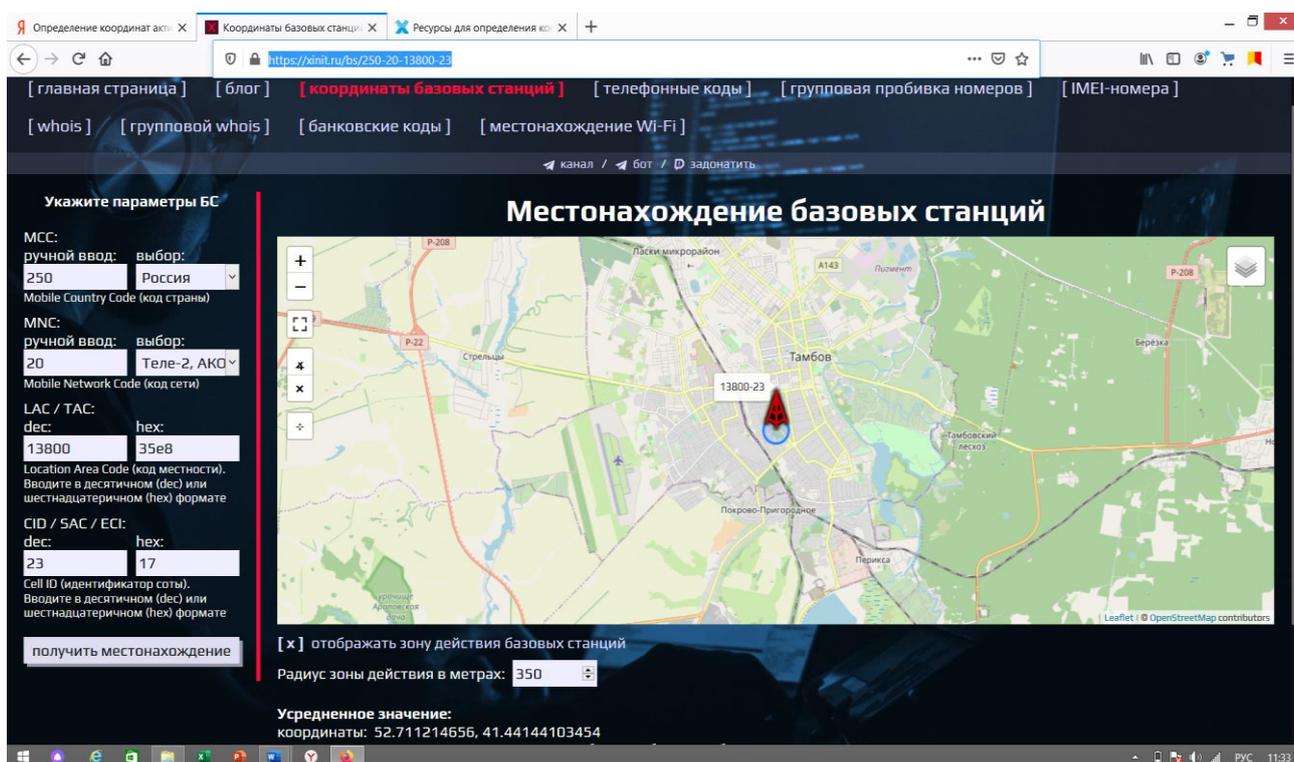


Рис. 7.3.4. Местонахождение БС по базе Yandex

адрес: Кронштадтская улица, 124-124, Тамбов, Тамбовская область, 392033

Mylnikov.org:

координаты: 52.711214656, 41.44144103454

адрес: Кронштадтская улица, 124-124, Тамбов, Тамбовская область, 392033

В результате получили координаты для данного сектора базовой станции. Более того, координаты по базам Google и Yandex практически совпали, а значит можно предположить, что БС построены на карте достаточно точно.

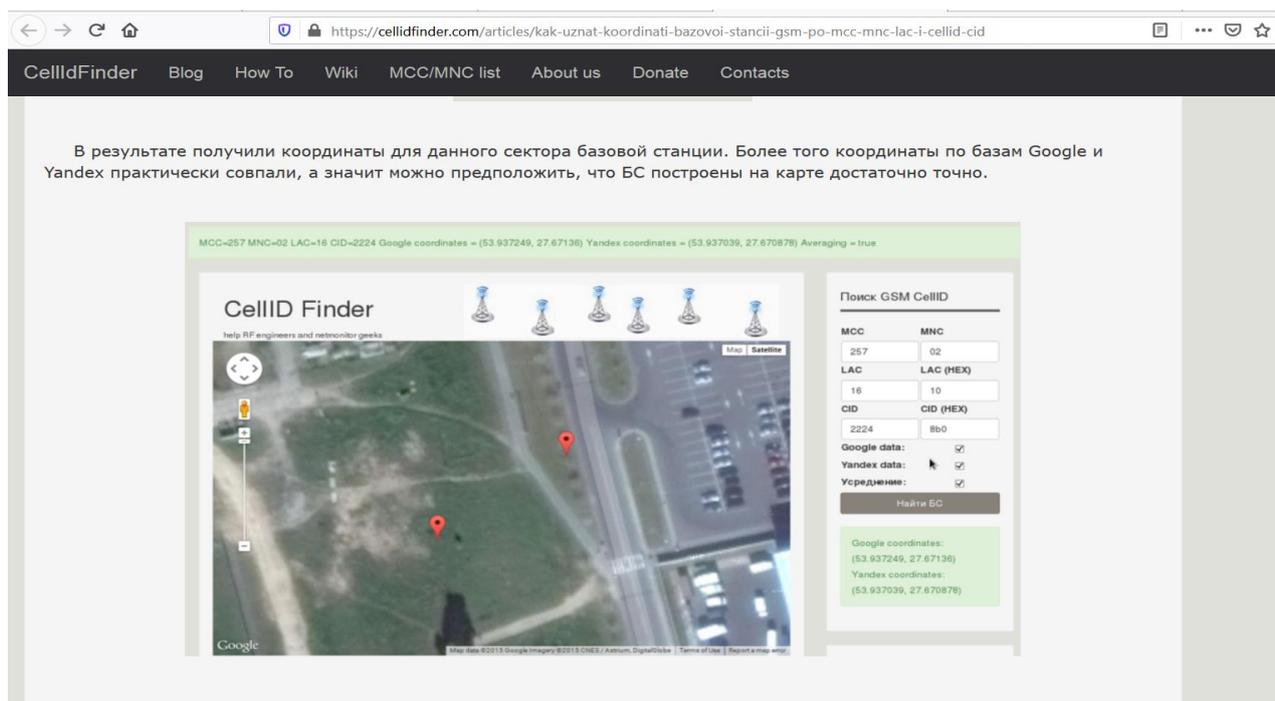


Рис. 7.3.5. Местонахождение БС по базе Google

7.3.2. Расчётные данные выполненной лабораторной работы

Тип сети	Код страны МСС	Код оператора сотовой связи МНС	Код локальной зоны ТАС/LAC	Идентификатор соты CELL ID/ECI (CID)	Географические координаты базовой станции

Контрольные вопросы

1. Радиомантенны обычно лучше всего работают при размере антенны, равном длине волны радиосигнала. Диаметр антенны варьируется в пределах от 1 см до 5 м. Какому диапазону частот это соответствует?

2. Каковы преимущества волоконной оптики как среды передачи по сравнению с медью? Есть ли какая-либо обратная сторона использования волоконной оптики вместо меди?

3. Какова пропускная способность полосы спектра в 0,1 мкм для длины волны в 1 мкм?

4. Лазерный луч диаметром 1 мм нацелен на детектор диаметром 1 мм, установленный на крыше здания на расстоянии 100 м. На какой угол должен отклониться лазерный луч, чтобы он промахнулся мимо детектора?

Лабораторная работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ СЕТИ WI-FI

Цель работы: определить параметры работы сети Wi-Fi и скорость передачи данных.

Методические указания

Wi-Fi стал повсеместной технологией в мире. Он обеспечивает подключение Wi-Fi для миллиардов устройств и является первым выбором для всё большего числа пользователей для доступа в Интернет. Кроме того, Wi-Fi постепенно вытеснил проводной доступ. Чтобы адаптироваться к новым сервисным приложениям и сократить разрыв с пропускной способностью проводной сети, каждое поколение стандартов 802.11 значительно повышает скорость беспроводной связи. По мере того, как видеоконференции, беспроводная интерактивная виртуальная реальность, мобильное обучение и различные другие сервисные приложения становятся всё более разнообразными, используется всё большее число терминалов доступа Wi-Fi. Кроме того, благодаря развитию Интернета вещей (IoT) становится доступным всё больше терминалов для «Умного дома». Поэтому крайне важно добиться улучшений с точки зрения сетей Wi-Fi, вмещающих различные типы терминалов. Это позволит удовлетворить требования пользователей к пропускной способности для различных типов приложений, запущенных на их терминалах.

Низкая эффективность сетей Wi-Fi, вызванная доступом большего количества терминалов, должна быть решена в стандарте Wi-Fi следующего поколения. Для решения этой проблемы ещё в 2014 г. была создана Исследовательская группа по высокой эффективности WLAN (HEW SG), а стандарт 802.11ax был ратифицирован в 2019 году. Благодаря внедрению таких технологий, как входящий MU-MIMO, множественный доступ с ортогональным разделением частот (OFDMA) и кодирование высокого порядка 1024 QAM, 802.11ax предназначен для решения проблем пропускной способности сети и эффективности передачи, связанных с такими аспектами, как использование ресурсов спектра и многопользовательский доступ. По сравнению с IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5), стандарт 802.11ax нацелен на четырёхкратное увеличение средней пропускной способности пользователя и увеличение числа одновременных пользователей более чем в три раза в условиях плотной пользовательской среды. Wi-Fi 6 – это сокращение от стандарта следующего поколения 802.11ax. Как и предыдущие стандарты 802.11, 802.11ax будет совместим с предыдущими стандартами 802.11ac/n/g/a/b. Устаревшие терминалы могут легко подключаться к сети 802.11ax. В таблице 7.4.1 перечислены даты выпуска, поддерживаемые диапазоны частот и новые названия стандартов 802.11.

7.4.1. Новые соглашения об именовании для стандартов 802.11

Release Date	802.11 Standard	Frequency Band	New Name
2009	802.11n	2.4 GHz or 5 GHz	Wi-Fi 4
2013	802.11ac Wave 1	5 GHz	Wi-Fi 5
2015	802.11ac Wave 2	5 GHz	
2019	802.11ax	2.4 GHz or 5 GHz	Wi-Fi 6

Wi-Fi 6 предназначен для беспроводного доступа с высокой плотностью и беспроводных услуг высокой пропускной способности, например, в открытых общественных местах большого масштаба, стадионах с высокой плотностью, закрытых офисах с высокой плотностью беспроводной связи и электронных классах (e-classroom). В этих сценариях количество STA, подключённых к сети Wi-Fi, значительно увеличивается за короткое время. Увеличение голосового и видеотрафика также приводит к перестройке сети Wi-Fi. Некоторые сервисы чувствительны к пропускной способности и задержке, например, видеопотоки 4K (пропускная способность 50 Мбит/с), голосовые потоки (задержка менее 30 мс), потоки виртуальной реальности (пропускная способность 75 Мбит/с и задержка менее 15 мс). Если задержка передачи вызвана перегрузкой сети или повторной передачей, это сильно повлияет на пользовательский опыт. Сеть Wi-Fi 5 может обеспечить большую пропускную способность. Однако по мере увеличения плотности доступа производительность пропускной способности сталкивается с узкой направленностью. Wi-Fi 6 внедряет такие технологии, как OFDMA, UL MU-MIMO и 1024-QAM, для обеспечения более надёжных услуг. В дополнение к большей пропускной способности доступа сеть может сбалансировать пропускную способность каждого пользователя. Например, если в электронном классе более 100 учащихся, то при передаче видео или взаимодействии по восходящей/нисходящей линии связи возникнут большие проблемы. Сеть Wi-Fi 6 легко справится с этим сценарием. До 802.11ax для передачи данных использовался режим OFDM, и пользователи различались на основе временных сегментов. В каждом временном сегменте один пользователь занимал все поднесущие и отправлял полный пакет данных, как показано на следующем рис. 7.4.1.

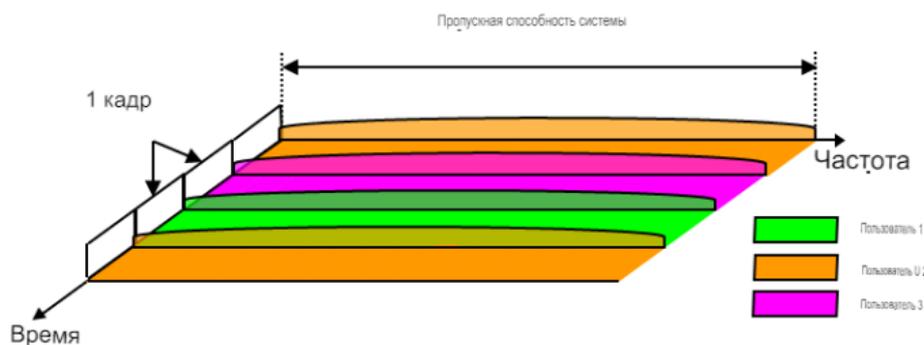


Рис. 7.4.1. Рабочий режим OFDM

OFDMA – это более эффективный режим передачи данных, представленный Wi-Fi 6 (рис. 7.4.2). Он также называется MU-OFDMA, поскольку Wi-Fi 6 поддерживает восходящий и нисходящий режимы MU. Эта технология позволяет нескольким пользователям повторно использовать ресурсы канала, выделяя поднесущие различным пользователям и добавляя множественный доступ в систему OFDM. На сегодняшний день OFDMA используется в 3GPP Long Term Evolution (LTE) среди множества других технологий. Кроме того, Wi-Fi 6 определяет наименьшую поднесущую как единицу ресурса (RU), которая включает в себя по меньшей мере 26 поднесущих и однозначно идентифицирует пользователя. Ресурсы всего канала разделены на небольшие RUs с фиксированными размерами. В этом режиме пользовательские данные передаются на каждом RU; следовательно, на общих частотно-временных ресурсах несколько пользователей могут отправлять данные в сегменте времени одновременно.

По сравнению с OFDM в OFDMA были внесены следующие улучшения:

- более точное распределение ресурсов канала (мощность передачи может быть распределена в зависимости от качества канала, особенно когда состояние канала определённых узлов ниже стандартного;
- улучшенное качество обслуживания. В стандартах IEEE 802.11ax и всех более ранних стандартах Wi-Fi для передачи данных пользователи занимают весь канал. Следовательно, кадр данных QoS может быть отправлен только после того, как текущий передатчик освободит весь канал, что приводит к длительной задержке. В режиме OFDMA один передатчик занимает лишь часть ресурсов всего канала. Таким образом, данные нескольких пользователей могут передаваться одновременно, тем самым уменьшая задержку доступа к сети на узлах QoS;
- больше одновременных пользователей и более высокая пропускная способность пользователя. OFDMA делит ресурсы всего канала на несколько поднесущих, которые затем делятся на несколько групп в зависимости от типа RU. Каждый пользователь может занимать одну или несколько групп для удовлетворения различных требований к пропускной способности. В Wi-Fi 6 минимальный размер и минимальная полоса пропускания поднесущей составляют 2 МГц и 78,125 кГц соответственно. Чем больше количество RUs, тем выше эффективность многопользовательской обработки и тем выше пропускная способность.

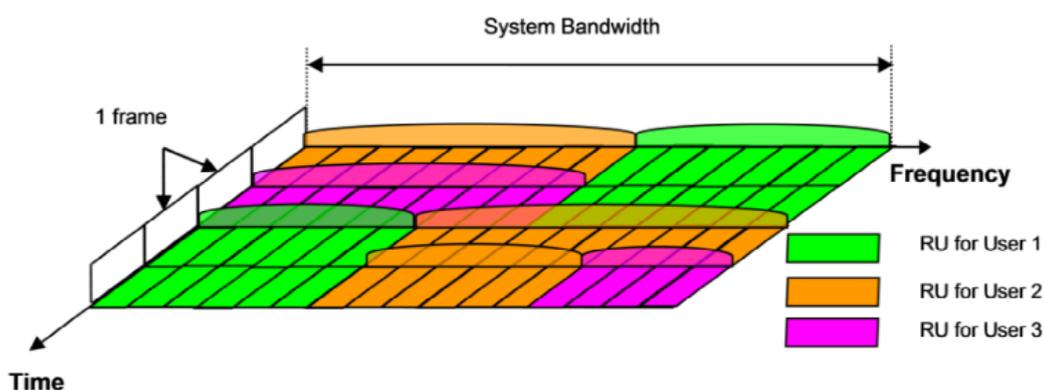


Рис. 7.4.2. Рабочий режим OFDMA

Технология MU-MIMO DL / UL. MU-MIMO использует пространственное разнесение каналов для передачи независимых потоков данных с одинаковой пропускной способностью. В отличие от OFDMA, все пользователи используют все полосы пропускания, что обеспечивает преимущества мультиплексирования. Ограниченный размером антенны терминал обычно поддерживает только один или два пространственных потока (антенны), что меньше, чем количество пространственных потоков (антенн) на точке доступа, поэтому внедряется технология MU-MIMO, позволяющая точке доступа передавать данные с нескольких терминалов одновременно, что значительно повышает пропускную способность. MU-MIMO был представлен с 802.11ac, но поддерживается только MU-MIMO DL 4×4. В 802.11ax количество MU-MIMO ещё больше увеличивается, и поддерживается MU-MIMO DL 8×8. Технология DL OFDMA может использоваться для одновременного выполнения передачи MU-MIMO и выделения различных RUS для многопользовательской передачи с множественным доступом, что увеличивает пропускную способность системы одновременного доступа и балансирует пропускную способность.

UL MU-MIMO – важная функция, представленная в 802.11ax. Подобно UL SU-MIMO, UL MU-MIMO использует одни и те же ресурсы канала для передачи данных в нескольких пространственных потоках с использованием многоантенной технологии передатчика и приёмника. Единственное отличие заключается в том, что несколько потоков данных UL MU-MIMO поступают от нескольких пользователей. Стандарты 802.11ac и более ранние стандарты 802.11 используют UL SU-MIMO, т.е. пользователь может получать данные только от одного пользователя, что неэффективно в многопользовательских сценариях одновременного использования. После того, как 802.11ax поддерживает UL MU-MIMO, технология UL OFDMA используется для обеспечения одновременной передачи данных по MU-MIMO и многопользовательской передачи с множественным доступом. Это повышает эффективность передачи данных в многопользовательских сценариях одновременной работы и значительно сокращает задержку приложения.

Хотя 802.11ax позволяет OFDMA и MU-MIMO работать одновременно, они отличаются друг от друга. OFDMA позволяет нескольким пользователям разделять каналы (подканалы) для повышения эффективности параллелизма. MU-MIMO позволяет нескольким пользователям использовать разные пространственные потоки для увеличения пропускной способности.

Стандарт 802.11ax направлен на увеличение пропускной способности системы, сокращение задержек и повышение эффективности в многопользовательских сценариях с высокой плотностью. Однако высокая эффективность и высокая скорость не являются взаимоисключающими. 802.11ac использует 256QAM, и каждый символ передает 8-битные данные ($2^8 = 256$). 802.11ax использует квадратурную амплитудную модуляцию 1024QAM, и каждый бит символа передаёт 10-битные данные ($2^{10} = 1024$). Таким образом, по сравнению с 802.11ac, 802.11ax увеличивает пропускную способность одного пространственного потока данных на 25%.

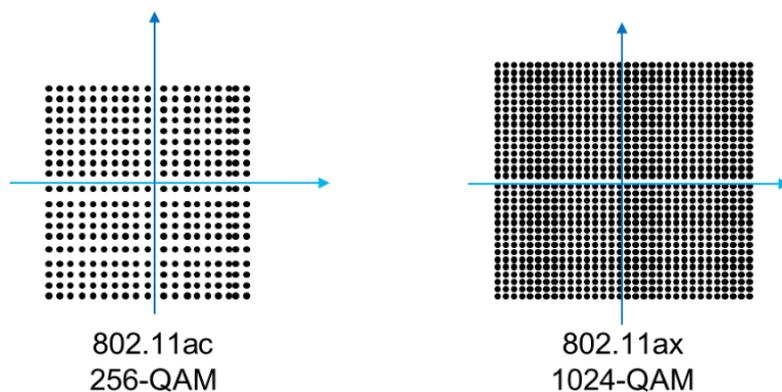


Рис. 7.4.3. Карты созвездий 256-QAM и 1024-QAM

7.4.2. Частотные полосы и каналы Wi-Fi в диапазоне 2,4 ГГц

Канал Wi-Fi	Нижняя частота	Центральная частота	Верхняя частота
1	2,401	2,412	2,423
2	2,406	2,417	2,428
3	2,411	2,422	2,433
4	2,416	2,427	2,438
5	2,421	2,432	2,443
6	2,426	2,437	2,448
7	2,431	2,442	2,453
8	2,436	2,447	2,458
9	2,441	2,452	2,463
10	2,446	2,457	2,468
11	2,451	2,462	2,473
12	2,4456	2,467	2,478
13	2,461	2,472	2,483

Как и у любой волны, у подобной есть качество затухания, которое напрямую зависит от частоты. 2.4 ГГц – это дециметровая гипервысокая частота. Длина волны примерно равняется 124,3 – 121,3 мм. При такой частоте скорость передачи данных будет выше, но при этом и радиус вещания не будет страдать.

На 2,4 ГГц работают такие стандарты как:

1. 802.11a
2. 802.11b
3. 802.11g

4. 802.11h
5. 802.11i
6. 802.11n

Чаще всего используется именно b, g и n. Первые два более старые и уже устаревают, но всё же пока осталось достаточно много устройств, работающих на этих стандартах. Скорость передачи у них от 11 до 54 Мбит/с. Последний N – более новый стандарт, изобретённый в 2009 г. Скорость передачи может достигать 600 Мбит/с при нескольких потоках. На одном потоке максимальная скорость – 300 Мбит/с.

5 ГГц. Данный стандарт был введён совершенно недавно. Диапазон частот варьируется от 5,170 ГГц до 5,905 ГГц. Используются стандарты типа 802.11a, h, j, n и ac. N тоже совместим с данной частотой, поэтому две сети могут существовать и работать как одно целое. Скорость передачи данных вырастает до нескольких гигабит в секунду. Это обусловлено как раз увеличением частоты в 2 раза. С увеличением частоты увеличивается и скорость передачи данных, но растёт затухание. Даже если не будет никаких препятствий, то волна затухнет куда быстрее. Именно поэтому эту частоту чаще используют в небольшом радиусе. Например, для подключения телевизора, компьютера или ноутбука вблизи роутера. Также большим минусом данной частоты является её неустойчивость к препятствиям. Следовательно, она ещё сильнее затухает: от стен, стекла, металла, деревьев, чем волна 2,4 ГГц. Для увеличения скорости применяется ещё одна ширина канала – 80 МГц. На данный момент её использовать вполне реально, так как количество каналов – 180, да и роутеров с поддержкой 5 ГГц не так много. Поэтому каналы у «пятёрки» свободнее. Затухание сигнала напрямую зависит от препятствия. Чем больше ширина препятствия, тем сильнее затухание. Также нужно учитывать и материал. В таблице 7.4.3 представлены примеры затухания сигнала.

Расчёт проводится по формуле:

$$D = W(100\% - П\%),$$

где W – это полный радиус действия волны без препятствий; $П$ – это процент потери диапазона; D – это окончательный диапазон волны после расчёта.

7.4.3. Затухание сигнала

№	Материал	Ширина, см	Потери сигнала, dB	П – процент потери в диапазоне, %
1	Улица без препятствий	0	0	0
2	Железобетон	5	25	90
3	Стекло	0.5	3	26
4	Дерево	2	9	45
5	Бетон	15	20	75
6	Бетон	31	23	82

Пример: дальность действия волны $W = 150$ м на открытой местности. Мы поставим на пути волны стекло в 1 см. Тогда $150(100\% - 26\% \cdot 2) = 78$ м. Самым серьёзным препятствием является металл. При правильном использовании его можно применять как отражатель волны. Так же к более плохой связи можно отнести способность огибать препятствие. И эта характеристика также зависит от длины волны. Так как 2,4 ГГц имеет меньший размер волны, то она способна почти без потерь обогнуть более широкое препятствие, чем волна 5 ГГц. Следовательно, чем больше длина, тем ниже скорость передачи, но меньше затухание от препятствий. К затуханию можно приписать естественную потерю мощности сигнала, которая уменьшается со временем пучка волны. От преград волна так же, как и от света, может отражаться. Чем больше отражается волна, тем слабее становится сигнал. Именно поэтому нельзя точно сказать, насколько далеко будет бить тот или иной роутер.

7.4.4. Данные для выполнения лабораторной работы

Номер варианта	Дальность действия волны w	Препятствие
1	200	1
2	200	2
3	130	3
4	100	4
5	450	5
6	780	6
7	314	1
8	250	2
9	780	3
10	537	4
11	890	5
12	670	6
13	45	1
14	80	2
15	92	3
16	124	4
17	876	5

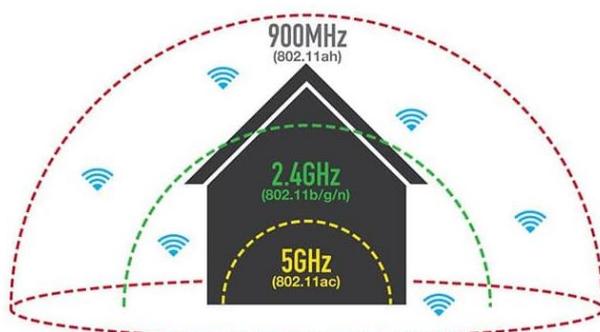


Рис. 7.4.5. Зависимость скорости передаваемого сигнала от препятствий.

В более дорогих моделях используется схема MIMO, т.е. передача данных происходит сразу в несколько потоков. При использовании данные разбиваются на число частей схемы MIMO и одновременно отправляются на приёмник. Но приёмник также должен поддерживать эту технологию.

Например, таким образом можно достичь скорости 7 Гбит/с, если использовать схему 8xMU-MIMO. Следовательно, у данного роутера должно обязательно стоять до восьми антенн или больше. Каждая антенна будет отправлять свой сигнал, а в конце они будут складываться. Дома чаще всего используют именно антенны широкого действия. Они обладают меньшим коэффициентом усиления, но сам пучок имеет больший радиус. При увеличении dB пучок становится более узким. Именно поэтому на мощных Wi-Fi-роутерах для увеличения покрытия используют сразу несколько мощных антенн. Активное распространение смартфонов, планшетов, ноутбуков и других типов «умных устройств» делают востребованным использование беспроводного Wi-Fi подключения к Интернету. Проверка скорости Wi-Fi позволяет узнать актуальные характеристики передачи данных и не требует установки дополнительного программного обеспечения.

Ход работы

1. Рассчитать по вариантам затухание сигнала.
2. Узнать характеристики сети Wi-Fi.
3. Найти самый не загруженный канал Wi-Fi.
4. Самый сильный сигнал по Wi-Fi.
5. Характеристики сети WPA.
6. Служебная информация Wi-Fi Beacon.
7. Анализ сетевого трафика Wireshark.
8. Сформулировать выводы по работе.

7.4.5. Расчётные данные

Тип сети	Каналы ГГц	Номер канала	Уровень сигнала, дБ	Скорость скачивания	Скорость отправки	Время простоя

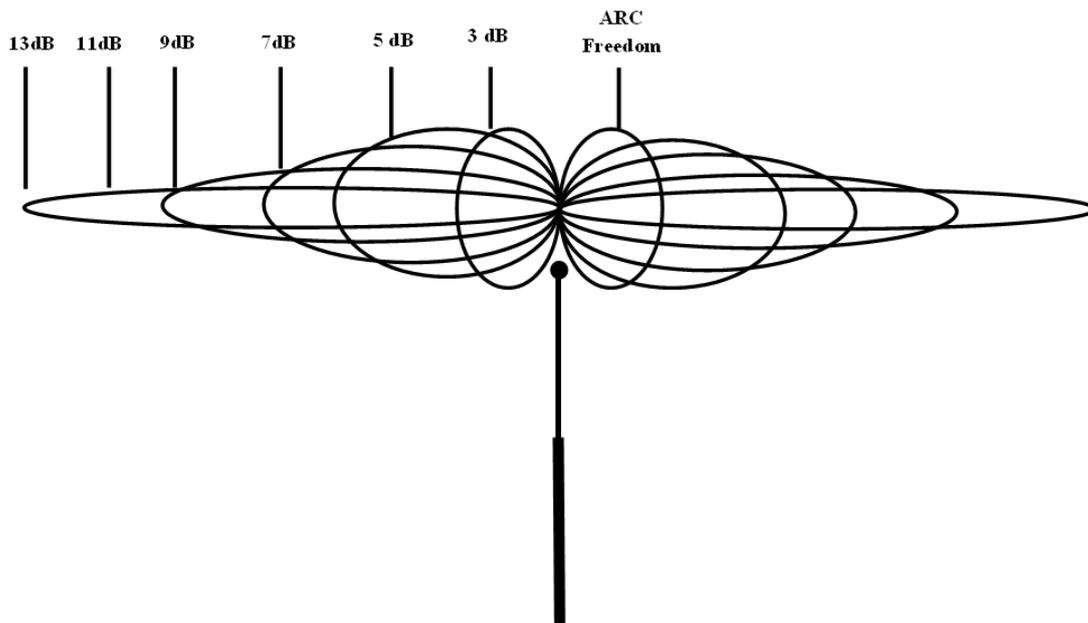


Рис. 7.4.6. Работа антенны широкого действия

Контрольные вопросы

1. Пусть по 11 Мбит/с локальной сети 802.11b передаются друг за другом по радиоканалу 64-байтные кадры с вероятностью ошибки 10^{-7} на бит. Сколько кадров в секунду в среднем будет искажаться при передаче?
2. В беспроводной ЛВС с одной точкой доступа есть 10 клиентских станций. У четырёх станций скорость передачи данных составляет 6 Мбит/с, у других четырех – 18 Мбит/с и у ещё двух – 54 Мбит/с. Какова скорость передачи данных каждой станции, когда все десять станций посылают данные одновременно?
 - 1) ТХОР не используется?
 - 2) ТХОР используется?
3. Назовите два сходства и два отличия WiMAX от 802.11.
4. Рассмотрим пять беспроводных станций, А, В, С, D и Е. Станция А может общаться со всеми остальными станциями. Станция В может общаться с А, С и Е. Станция С может общаться с А, В и D. Станция D может общаться с А, С и Е. Станция Е может общаться с А, D и В.
 - 1) Когда А посылает в В, какие другие коммуникации возможны?
 - 2) Когда В посылает в А, какие другие коммуникации возможны?
 - 3) Когда В посылает в С, какие другие коммуникации возможны?

Лабораторная работа 5

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТРАФИКА СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Цель работы: изучение свойств трафика в сети передачи данных, параметров трафика, характеристик потоков трафика, методов измерений и анализа параметров трафика и качества обслуживания.

Задание на лабораторную работу

1. Организовать способы измерений трафика.

2. Произвести измерения показателей трафика.
3. Выполнить обработку результатов измерений.
4. Вычислить интервальные оценки основных параметров трафика.
5. Сделать выводы.

Модельная сеть и условия проведения измерений

1. **Точка регистрации трафика.** В данном исследовании выполняется анализ клиентского трафика на интерфейсе «пользователь–сеть». Модельная сеть представляет собой компьютер, включённый в локальную сеть передачи данных и имеющий доступ к сети Интернет, либо непосредственно включённый в сеть провайдера услуг доступа в Интернет.

2. **Средства измерений.** Для измерений параметров трафика используется свободно распространяемое программное обеспечение Wireshark.

3. **Подготовка к проведению измерений.** Скачать с сайта <https://www.wireshark.org/download.html> и установить, если ранее не было установлено, программное обеспечение Wireshark.

4. **Выбор услуги.** Анализ трафика выполняется для услуги потокового видео. Услуга предоставляется в сети Интернет, адрес сайта: 1tv.ru.

Проведение измерений и подготовка данных

Открываем в браузере указанный сайт и выбираем онлайн-трансляцию. В окне браузера отображается видео трансляции. Запускаем Wireshark и выбираем локальную сеть (Ethernet-карту), запускаем захват пакетов. Наблюдаем в окне Wireshark непрерывно пополняемый список пакетов, регистрируемых на выбранном интерфейсе (рис. 7.5.1).

Продолжаем процесс, пока число захваченных пакетов не достигнет ориентировочно 20 000, после чего останавливаем процесс захвата пакетов. Полученные данные, при необходимости, можно сохранить в файл для дальнейшей обработки.

5. **Подготовка данных для анализа распределения.** Среди захваченных пакетов выделяем пакеты потока видео. Для этого находим среди них IP-адрес источника пакетов. Введя в поле «Filter» строку `ip.src=XX.XX.XX.XX`, где `XX.XX.XX.XX` – IP-адрес источника, и нажав Enter, отфильтровываем только пакеты, поступившие от выбранного источника (рис. 7.5.2).

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=1 Ack=1 win=672 Len=1460
2	0.000056000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=1461 win=65335 Len=0
3	0.000066000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=1461 Ack=1 win=672 Len=1460
4	0.000919000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=2921 Ack=1 win=672 Len=1460
5	0.000024000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=4381 win=65335 Len=0
6	0.000138000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=4381 Ack=1 win=672 Len=1460
7	0.001861000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=5841 Ack=1 win=672 Len=1460
8	0.000035000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=7301 win=65335 Len=0
9	0.000265000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=7301 Ack=1 win=672 Len=1460
10	0.000335000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=8761 Ack=1 win=672 Len=1460
11	0.000027000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=10221 win=65335 Len=0
12	0.000137000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=10221 Ack=1 win=672 Len=1460
13	0.001311000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=11681 Ack=1 win=672 Len=1460
14	0.000030000	192.168.1.154	37.29.0.37	TCP	54	56461-80 [ACK] Seq=1 Ack=13141 win=65335 Len=0
15	0.000284000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=13141 Ack=1 win=672 Len=1460
16	0.000243000	37.29.0.37	192.168.1.154	TCP	1514	80-56461 [ACK] Seq=14601 Ack=1 win=672 Len=1460

Рис. 7.5.1. Результат регистрации потока пакетов

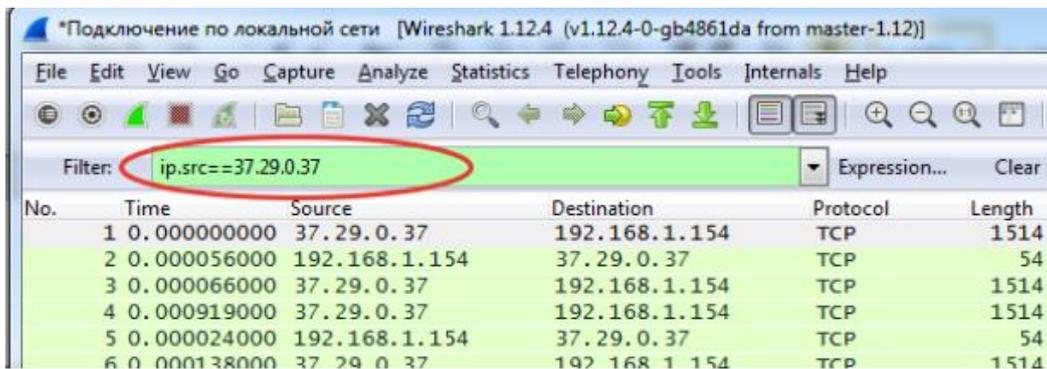


Рис. 7.5.2. Фильтрация потока

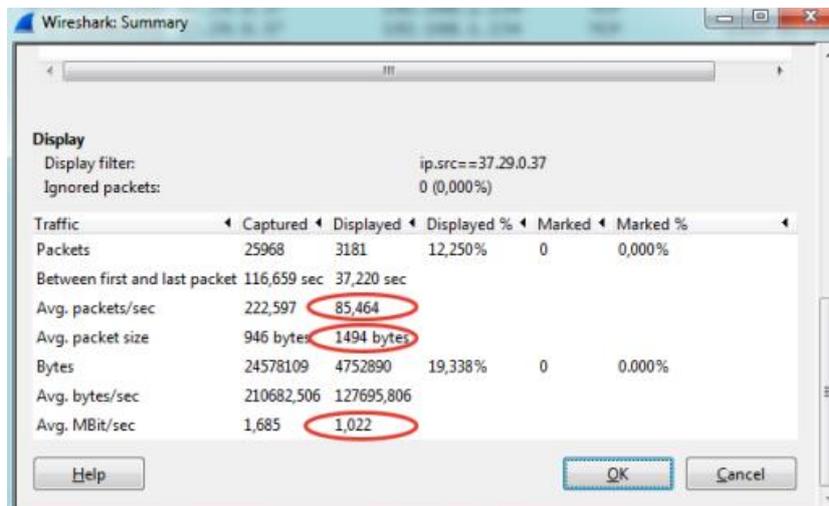
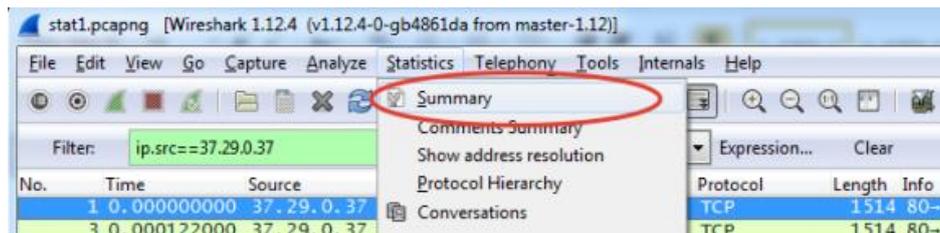


Рис. 7.5.3. Выбор оценок параметров трафика

6. **Оценка параметров трафика в меню Wireshark.** Выбираем пункт Statistics->Summary (рис. 7.5.3). В открывшемся окне находим такие параметры, как: интенсивность пакетов (среднее число пакетов в секунду), средний размер пакета, интенсивность трафика (Мбит/с). Согласно данным программы, интенсивность пакетов $\lambda = 85,464$ пакета/с, средний размер пакета $L = 1494$ байта, интенсивность трафика $a = 1,022$ Мбит/с.

7. **Доверительные интервалы для полученных оценок.** Выберем меню Statistics->IO Graph. В поле «Filter» вводим IP-адрес источника пакетов и нажимаем Enter. Проверяем значения в полях, выделенных на рис. 7.5.4.

Нажимаем кнопку «Сору». Открываем табличный процессор (в данном примере MS Excel, также можно использовать MATLAB, Mathcad) и переносим данные через «мастер вставки» как текст с разделителями, выбрав в качестве разделителя запятую. В результате получаем таблицу, приведённую на рис. 7.5.5.

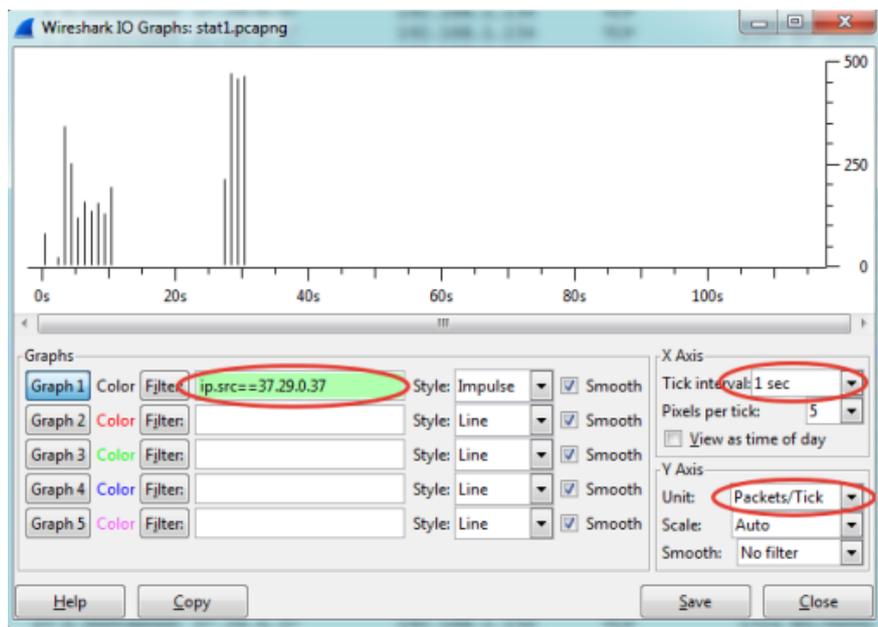


Рис. 7.5.4. Получение значений за секундные интервалы

Interval st	Graph 1
0	80
1	0
2	22
3	340
4	250
5	117

Рис. 7.5.5. Экспорт данных в табличный процессор

35	0
36	0
37	2
Среднее	85,465

Рис. 7.5.6. Вычисление среднего значения

35	0
36	0
37	2
Среднее	85,465
СКО	141,4
Дов. инт.	38,236

Рис. 7.5.7. Вычисление доверительного интервала для интенсивности пакетов

В таблице (рис. 7.5.5) число строк равно числу секунд. В первом столбце номер секунды, а во втором столбце число зарегистрированных пакетов. Для проверки своих действий вычислим интенсивность пакетов, просуммировав число пакетов во втором столбце и разделив его на время регистрации пакетов (рис. 7.5.4 – 37,220 с) (рис. 7.5.6).

В результате получили 85,465 (на рис. 7.5.6 – 85,464). Разница результатов в 0,001 обусловлена операциями округления, будем считать её незначительной. Далее для данного столбца вычислим среднеквадратическое отклонение (СКО) и полуширину доверительного интервала (рис. 7.5.7).

При вычислении доверительного интервала выберем доверительную вероятность 0,9.

Таким образом, результат оценки интенсивности пакетов можно записать как $\lambda = 85 \pm 38$ пакетов/с.

Как видим, относительная погрешность полученной оценки составляет около 45%.

Примечание. Если в задании требуется более высокая точность, то следует увеличить объём выборки, продолжив измерения. Необходимый объём выборки можно будет определить как

36	0
37	960
Среднее	1,022
СКО	1701233
Дов. инт.	0,46

Рис. 7.5.8. Вычисление доверительного интервала для интенсивности трафика

$$N = \left(g_{1-\frac{\alpha}{2}} \frac{\delta}{\lambda \delta_0} \right)^2. \quad (7.5.1)$$

Например, при допустимой относительной погрешности $\delta_0 = 0,1(10\%)$ и доверительной вероятности $0,9$ требуемое количество измерений составит

$$N = 1,64 \frac{141,000}{38,236 \cdot 0,1} \approx 3678.$$

8. Доверительный интервал для интенсивности трафика. Доверительный интервал для интенсивности трафика вычисляется аналогичным образом с той разницей, что в начале (рис. 7.5.5) в поле «Unit» выбирается «Bits/Tick». Последующие операции аналогичны приведенным выше. В результате получаем (рис. 7.5.8).

Таким образом, результат оценки интенсивности трафика можно записать, как $a = 1,00 \pm 0,46$ Мбит/с. При доверительной вероятности $0,9$.

9. Доверительный интервал для размера пакета. Из основного окна Wireshark сохраняем отфильтрованные пакеты в файл (рис. 7.5.9).

Открываем сохраненный файл из текстового процессора с использованием мастера импорта, в результате чего получаем таблицу (рис. 7.5.10).

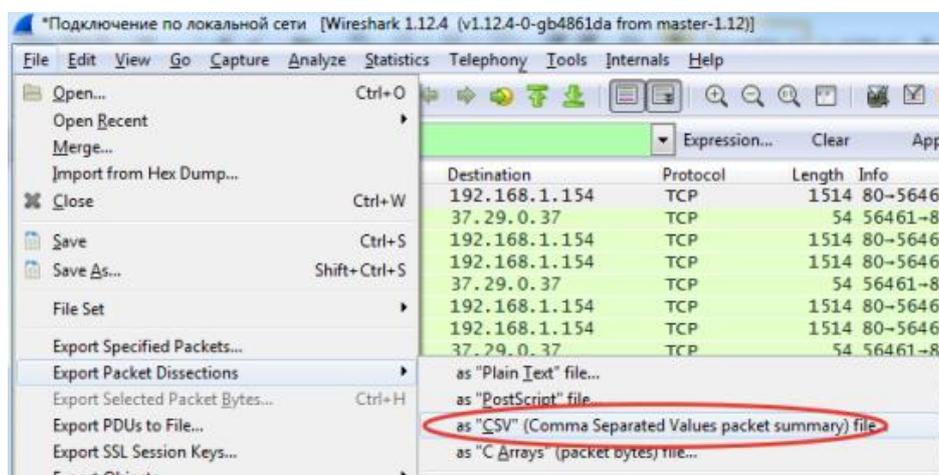


Рис. 7.5.9. Сохранение данных в текстовый файл

No	Time	Source	Destinatic	Protocol	Length	Info
1	0	37.29.0.37	192.168.1.	TCP	1514	80>56461[ACK]Seq=1 Ack=1 Win=672 Len=1460
3	0,000122	37.29.0.37	192.168.1.	TCP	1514	80>56461[ACK]Seq=1461 Ack=1 Win=672 Len=1460
4	0,000919	37.29.0.37	192.168.1.	TCP	1514	80>56461[ACK]Seq=2921 Ack=1 Win=672 Len=1460
6	0,000162	37.29.0.37	192.168.1.	TCP	1514	80>56461[ACK]Seq=4381 Ack=1 Win=672 Len=1460
7	0,001861	37.29.0.37	192.168.1.	TCP	1514	80>56461[ACK]Seq=5841 Ack=1 Win=672 Len=1460

Рис. 7.5.10. Результат экспорта данных

Удаляем лишние столбцы, оставляя только «Time» и «Length». Для столбца «Length» вычисляем среднее значение, СКО и доверительный интервал, как это было сделано ранее. Результаты оценки приведены на рис. 7.5.11.

6,677782	60
0,111115	60
Среднее	1494
СКО	158
Дов. инт.	5

Рис. 7.5.11. Результат оценки

Таким образом, результат оценки среднего размера пакета можно записать как $L = 1494 \pm 5$ байт. Как видим, относительная погрешность полученной оценки составляет около 0,3%.

7.5.2. Результаты оценки параметров трафика

№	Параметр	Единица измерения	Значение
1	Интенсивность пакетов	пакетов/с	85 ± 38
2	Интенсивность трафика	Мбит/с	$1,00 \pm 0,46$
3	Размер пакета	байт	1494 ± 5

7.5.3. Полученные данные исследования

№	Параметр	Единица измерения	Значение
1	Продолжительность	с	37,220
2	Число пакетов	шт.	3181

Задание: требуется провести оценку параметров трафика (интенсивности пакетов среднего размера пакета и интенсивности трафика на уровне пользователя) при предоставлении услуг связи.

7.5.4. Исходные данные для каждого варианта

№ варианта	Услуга	Адрес
1	Телевидение	https://federal.tv
2	Телевидение	http://glaz-tv.online/tv-online
3	Телевидение	https://limehd.tv/tv
4	Телевидение	https://ontvtime.tv/
5	Телевидение	https://www.ivi.ru/tvplus
6	Телевидение	https://tv.mail.ru/online/
7	Радио	https://online-red.com/radio
8	Радио	https://onlayn-radio.ru/
9	Радио	https://www.radiobells.com/
10	Радио	https://radioplayer.ru/

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перспективы развития инфокоммуникационных систем и сетей заключаются в развитии цифровых методов передачи, расширении зоны применения волоконной оптики и систем радиосвязи, широком применении технологий коммутации пакетов. В области радиосвязи интенсивно применяются технологии коммутации пакетов. Быстро развиваются технологические сети (Bluetooth, ZigBee), мобильные сети четвёртого и последующих поколений, технологии OFDM. В результате курсового проекта по построению инфокоммуникационных систем и сетей студенты изучают основные типы цифровых сетей и их характеристики, построение сотовой сети, в том числе частотно-территориального плана и его составляющих: кластер, сота, зона обслуживания центра коммутации подвижной службы, рассчитывают число каналов в каждой частотной группе, присвоенной соте, число базовых станций в сети НБС, распределение частотных групп между сотами, проводят расчёт допустимой телефонной нагрузки и др. В ходе выполнения лабораторных работ бакалавры получают навыки мониторинга состояния и проверки качества работы телекоммуникационного оборудования и сетевых устройств с применением современного программного обеспечения.

Учебное пособие «Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей» является основой введения студента в освоение большого комплекса проблем, связанных с управлением использованием радиочастотного спектра. Эти проблемы возникают не только на национальном, но и на международном уровне, и регулирование использования РЧС осуществляется с применением как технических, так и экономических методов. Правильное управление использованием РЧС обеспечивает электромагнитную совместимость радиосистем фиксированной, подвижной и вещательной служб, радиосистем, расположенных на одном объекте, а точные расчёты и грамотный выбор необходимого радиоэлектронного оборудования при планировании систем связи позволяют добиться максимальной ЭМС, качественного обслуживания и предоставления надёжной связи абонентам в пределах зоны покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзерол. – 5-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2015. – 960 с.
2. Удовикин, В. Л. Системы и сети связи с подвижными объектами [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Л. Удовикин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с.
3. Голиков, А. М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика : учебное пособие для вузов / А. М. Голиков. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 452 с.
4. Изучение принципов функционирования современных сетей с коммутацией пакетов : методические рекомендации / Сост. : А. А. Лысиков, Е. В. Глушак, В. С. Захаров. – Самара : ПГУТИ, 2020. – 43 с.
5. Гаврилов, А. В. Современные принципы и технологии управления инфокоммуникационными сетями : учебное пособие / А. В. Гаврилов. – Пермь : ПНИПУ, 2021. – 202 с.
6. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации : программа дисциплины для студентов по специальности «Прикладная информатика». – Ставрополь : СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2008. – 18 с.
7. Казанский, Н. А. Изучение спектральных характеристик цифровых тестовых сигналов в каналах ВОСП : учебно-методическое пособие / Н. А. Казанский, Д. И. Кашин, А. В. Рыбалка. – Москва : РУТ (МИИТ), 2020. – 36 с.
8. Величко, В. В. Основы инфокоммуникационных технологий : учебное пособие / В. В. Величко, Г. П. Катунин, В. П. Шувалов ; под ред. В. П. Шувалова. – 2-е изд., доп. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2018. – 742 с.
9. Гордиенко, В. Н. Многоканальные телекоммуникационные системы : учебник / В. Н. Гордиенко, М. С. Тверецкий. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2017. – 396 с.
10. Степанова, И. В. Основы систем управления : учебное пособие / И. В. Степанова. – Москва : МТУСИ, 2021. – 63 с.
11. Зикий, А. Н. Детектирование радиосигналов в телекоммуникационных системах : учебное пособие / А. Н. Зикий, А. В. Помазанов. – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2021. – 173 с.
12. Перспективные технологии в инфокоммуникационных системах. Архитектура OTN : учебное пособие / А. Ю. Матюхин, М. А. Мельтенисов, А. Г. Подгайский, Е. Л. Федорова. – Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича, 2021. – 55 с.
13. Зырянов, Ю. Т. Антенны : учебное пособие для вузов / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 412 с.
14. Карпухин, Е. О. Технологии и методы защиты инфокоммуникационных систем и сетей : учебное пособие / Е. О. Карпухин. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2021. – 120 с.
15. Кулева, Н. Н. Перспективные технологии в инфокоммуникационных системах. Архитектура SDN : учебное пособие / Н. Н. Кулева, Е. Л. Федорова. – Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2016. – 58 с.

16. Зырянов, Ю. Т. Антенны : учебное пособие для вузов / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин. – 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 412 с.
17. Мелихова, Е. В. Инфокоммуникационные технологии обработки экспериментальных данных в агроинженерии : учебное пособие / Е. В. Мелихова, А. Ф. Рогачев. – Волгоград : Волгоградский ГАУ, 2018. – 112 с.
18. Сильвашко, С. А. Информационные технологии в электронике, радиотехнике и системах связи : учебно-методическое пособие / С. А. Сильвашко. – Оренбург : ОГУ, 2019. – 265 с.
19. Дямина, Э. И. Инфокоммуникационные технологии : учебно-методическое пособие / Э. И. Дямина, Е. П. Жилко, Р. Р. Рамазанова. – Уфа : БГПУ имени М. Акмуллы, 2021. – 198 с.
20. Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи. Обслуживание и эксплуатация оборудования транспортных сетей. Синхронные мультиплексоры : учебное пособие / В. А. Александров, С. В. Мельников, А. А. Муравцов и др. – Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М. А. Бонч-Бруевича, 2013. – 89 с.
21. Модулярная арифметика и её приложения в инфокоммуникационных технологиях : монография / Н. И. Червяков, А. А. Коляда, П. А. Ляхов и др. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2017. – 400 с.
22. Инфокоммуникационные сети : энциклопедия / С. П. Воробьев, А. Е. Давыдов, В. В. Ефимов, В. И. Курносов. – Т. 1. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Изд-во «Наукоёмкие технологии», 2019. – 739 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Параметр сети	№ варианта																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Стандарт CCC	GSM	GSM-1800	UMTS	LTE	GSM	GSM-1800	UMTS	LTE	GSM	GSM-1800	UMTS	LTE	GSM	GSM-1800	UMTS	LTE	GSM	GSM-1800
Частотный разнос между каналами F_k , кГц	200	200	500	350	30	200	440	240	200	25	480	200	200	340	490	500	200	200
Полоса частот БС на передачу ΔF , МГц	25	95	5	95	75	45	5	70	60	25	35	30	25	20	5	50	75	30
$f_{\min} \dots f_{\max}$, МГц	890,1... 894,1/ 935,1... 939,1	1710... 1725/ 1805... 1820	1935... 1950/ 2125... 2140	1710... 1785/ 1805... 1880	894,3... 899,1/ 939,3... 944,1	1725... 1740/ 1820... 1835	1920... 1935/ 2110... 2125	2500... 2570/ 2620... 2690	894,3... 904,7/ 939,3... 949,7	1770... 1785/ 1865... 1880	1920... 1980/ 2110... 2170	832... 862/ 791... 821	907,5... 914,9/ 952,5... 959,9	1740... 1755/ 1835... 1850	1950... 1965/ 2140... 2155	2570... 2620/ 2570... 2620	904,1... 904,9/ 949,1... 949,9	1755... 1770/ 1850... 1865
Число обслуживаемых абонентов N_a , тыс. шт.	10	20	4	5	6	8	15	6	7	9	12	14	17	25	8	15	7	10
Активность одного абонента в час наибольшей нагрузки (ЧНН) β , Эрл.	0,03	0,06	0,04	0,05	0,07	0,08	0,09	0,06	0,03	0,05	0,09	0,08	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,02
Вероятность блокирования вызова P_b	0,05	0,1	0,15	0,2	0,05	0,1	0,05	0,1	0,15	0,2	0,05	0,1	0,5	0,2	0,1	0,3	0,15	0,18
Защитное отношение $P/P_{\text{пом}} = \rho_0$, дБ	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Площадь обслуживаемой территории S_0 , км ²	5	10	2	3	3	10	12	3	5	7	8	5	7	8	6	4	7	9
Диапазон случайных флуктуаций уровня сигнала α , дБ	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Чувствительность приёмника мобильной станции (МС) $P_{\text{прМС}}$, дБВт	-110	-115	-100	-95	-90	-100	-120	-115	-105	-95	-100	-83	-87	-94	-97	-99	-116	-120
ЭИИМ передатчика базовой станции (БС) $P_{\text{эБС}}$, Вт	300	30	30	50	200	100	20	50	100	500	300	50	30	80	250	270	450	230
Коэффициент усиления антенны БС $G_{\text{БС}}$, дБ	6	6	5	5	3	6	5	3	3	5	6	7	5	8	4	5	3	8
Высота подвеса антенны БС $h_{\text{БС}}$, м	100	150	50	50	70	150	100	50	70	80	150	90	70	130	70	130	160	90
Погонные потери в фидере БС α_0 , дБ/м	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,015	0,015	0,01	0,015	0,01	0,02	0,015	0,01	0,02	0,01	0,015	0,01

СОДЕРЖАНИЕ

Список основных сокращений	3
Введение	5
1. Описание стандартов связи 1G и 2G	8
1.1. Первое поколение. Аналоговые мобильные беспроводные телекоммуникационные системы	8
1.2. Второе поколение. Цифровые сотовые системы связи	10
2. Технологии построения сотовых сетей связи стандарта GSM	13
3. Третье поколение мобильной связи	19
4. Архитектура сети мобильной связи стандарта LTE	25
4.1. Интерфейсы сети LTE. Эталонная модель OSI. Сигналы телеметрии ..	28
4.2. Интерфейс UU	39
5. Сети нового поколения	45
5.1. Пятое поколение 5G	45
5.2. Концепция развития 6G	53
6. Курсовое проектирование «Расчёт основных параметров сотовой сети связи»	55
6.1. Разработка частотно-территориального плана сети связи	62
6.1.1. Принцип составления ЧТП ССПО	62
6.1.2. Составление ЧТП ССПО	76
7. Лабораторные работы	78
Лабораторная работа 1. Усиление мобильной связи и Интернета. Измерение сигнала	78
Лабораторная работа 2. Определение уровня сигнала активной базовой станции	86
Лабораторная работа 3. Определение координат активной базовой станции для подвижного абонента	93
Лабораторная работа 4. Определение скорости передачи сети Wi-Fi	102
Лабораторная работа 5. Анализ параметров трафика сети передачи данных	110
Заключение	116
Список литературы	117
Приложение. Варианты заданий на курсовую работу	119

Учебное электронное издание

КУРНОСОВ Роман Юрьевич
ЧЕРНЫШОВА Татьяна Ивановна
КАМЕНСКАЯ Мария Анатольевна
АРТЕМОВА Светлана Валерьевна

ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Учебное пособие

Редактор И. В. Калистратова
Компьютерное макетирование М. А. Евсейчевой
Обложка, упаковка, тиражирование И. В. Калистратовой

ISBN 978-5-8265-2554-8



Подписано к использованию 12.04.2023.
Тираж 50 шт. Заказ № 27

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Телефон: (4752) 63-81-08
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru