



Некоммерческое акционерное общество  
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Радиотехники и связи

Специальность 6М071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Кафедра Телекоммуникационных систем

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Ким Станиславу Эдуардовичу

Тема диссертации Исследование перспектив развития технологий сетей сотовой связи

Утверждена Ученым советом университета, Приказ №10 от «12» декабря 2014 г.

Срок сдачи законченной диссертации « » января 2015 г.

Цель исследования: Всесторонний анализ технологий сетей сотовой для выявления перспектив развития.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1 Обзор технологий трех поколений сетей сотовой связи и анализ особенности стандартов GSM, UMTS, LTE advance.

2 Исследование принимаемых мобильным терминалом характеристик сигнала для второго, третьего и четвертого поколения связи.

3 Расчет модели Окамуры и Хаты

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1 Уровни принимаемой мощности сигнала в малонаселенной местности; 2 Отношение сигнал/шум в малонаселенной местности; 3 Отношение сигнал/шум в густонаселенной местности; 4 Уровни принимаемой мощности сигнала в густонаселенной местности; 5 Структура сети стандарта UMTS; 6 Структура сети стандарта LTE.

Рекомендуемая основная литература:

1 Печаткин А. В. Системы мобильной связи. Часть 1.- Рыбинск: РГАТА, 2008.

2 Гольдштейн Б.С., Ехриель И.М., Рерле Р.Д. Интеллектуальные сети.- М.: Радио и связь, 2000.

3 Невдяев Л. М. Мобильная связь третьего поколения - М. МЦНТИ 2009

4 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband - Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold, 2011.

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
1. Изучение технологии второго, третьего и четвертого поколения связи с целью анализа особенностей технологий	5.03.14	выполнено
2. Выбор наиболее используемых технологий сотовой связи, для сравнения характеристик принимаемого сигнала	15.10.14	выполнено
3. Проведение экспериментов по измерению характеристик принимаемого сигнала мобильным терминалом при различных условиях	31.07.14	выполнено
4. Расчет модели Окамуры и Хаты для технологии второго, третьего и четвертого поколения связи	10.10.14	выполнено
5. Обобщение результатов экспериментов.	1.01.15	выполнено

Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

подпись

Байкенов А.С.  
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_

подпись

Кудинова В.С.  
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению  
магистрант \_\_\_\_\_

подпись

Ким С.Э.  
(Ф.И.О.)

## **Андатпа**

Бұл қағаз жасушалық технологияларды жан-жақты талданған. Ұялы терминал арқылы қабылданатын сигналдың сипаттамаларын эксперименттік салыстыру ескере әрбір коммуникациялық технологиялар сипаттамаларын ескере отырып. Сондай-ақ, назарға түрлі экологиялық жағдайды және басқа да сыртқы факторлардың қабылданды. Қолданыстағы ұялы технологиялар мен даму перспективалары анықталған кемшіліктерді.

## **Аннотация**

В работе представлен всесторонний анализ технологий сотовой связи. Произведено экспериментальное сравнение характеристик принимаемого сигнала мобильным терминалом, при учете особенностей каждой технологии связи. Так же были учтены различные условия окружающей среды и других сторонних факторов. Выявлены слабые стороны существующих технологий сотовой связи и определены перспективы развития.

## **Annotation**

This paper presents a comprehensive analysis of cellular technology. The experimental comparison of the characteristics of the received signal by the mobile terminal, taking into account the characteristics of each communication technologies. Were also taken into account the different environmental conditions and other external factors. Identified weaknesses in existing cellular technologies and development perspectives.

## **Введение**

Жизнь современного человека нельзя представить без технологий сотовой связи. На сегодняшний день в мире используются три поколения связи, со своими технологиями и особенностями. Каждое из них принесло свои изменения в развитие технологий сетей сотовой связи.

Технологии мобильной связи берут свое начало в 1832 году, когда в Санкт-Петербурге состоялась презентация первого в мире телеграфа изобретенного П.Л. Шиллингом. А спустя 44 года в 1876 году Александром Грэхемом Белом был изобретен первый телефонный аппарат. Следующие знаменательные события в развитии отрасли связи, это изобретение Александра Степановича Папова – радио, которое было изобретено 7 мая 1895 году. После было много значимых событий в развитии сотовой связи, но первая в мире система сотовой связи была введена только в 1981 году, на базе аналогового стандарта NMT 450. А первая цифровая система сотовой связи появилась в 1991 году, на базе стандарта GSM, который дал начало второму поколению связи. Следующим улучшением сети был стандарт UMTS, который уже относился к третьему поколению связи. Этот стандарт повысил емкость сети и улучшил скорость передачи данных. После стандарта UMTS, в 2000-х годах пришел стандарт LTE и LTE advance, они повысили пропускную способность канала для абонентов и улучшили его стойкость к помехам, также появились новые услуги.

Между тем с прогрессом систем сотовой связи растут потребности потребителей. Как например в начале 90-х годов большой популярностью у людей был голосовой трафик. А в наше время голосовой трафик постепенно уходит на второй план, его планомерно вытесняет пакетная передача данных. Растут объемы передаваемых данных, так как все больше и больше сред подвергаются автоматизации, вырос спрос у людей на мультимедийный трафик, стало доступно интерактивное обучение и телевиденье. Но все существующие стандарты не идеальны, каждое поколение имеет свои преимущества.

Цель работы:

Анализ принимаемого сигнала 2, 3 и 4 поколения связи для исследования перспектив развития.

Задачи работы:

- провести замеры принимаемого сигнала каждого поколения связи при различных технологиях и условиях;
- провести сравнение полученных результатов исследования;
- на основе анализа обозначить перспективы развития сотовой связи.

## **1. Технологии сотовой связи**

## 1.1 Второе поколение связи (2G)

Сегодня в сотовый или мобильный Global System for Mobile Communications (GSM) телефон является наиболее популярным во всем мире. Global System for Mobile Communications (GSM) телефоны широко доступны по хорошим ценам, а сети являются достаточно надежными. Система Global System for Mobile Communications (GSM) многофункциональна и предлагает такие услуги, как массовая рассылка смс, международный роуминг и тому подобное. Кроме того, технология постоянно совершенствуется, том числе с помощью технологий GPRS и EDGE. Для достижения этого уровня успеха потребовалось много лет технического развития и международного сотрудничества.

Первые сотовые телефоны были аналоговыми. Обычно они использовали частотную модуляцию для передачи голосовых сообщений и данных. По сравнению с современными эти системы были сравнительно просты. Две основные системы, которые существовали до Global System for Mobile Communications (GSM) были AMPS (Advanced Mobile Phone System), которая была использована в США и многих других стран и TACS (Total Access Communications System), которая использовалась в Великобритании, а также многими другими странами во всем мире.

Работала и другая система связи - Nordic Mobile Telephone system (NMT), которая была первой коммерческой системой. Она была разработана консорциумом компаний в Скандинавии и показала, что международное сотрудничество в проектировании и эксплуатации возможно.

Использование систем радиосвязи во всем мире резко возросло в следствии чего начали ощущаться ограничения распределения частот. Чтобы преодолеть эти ограничения были приняты определенные меры. Для этого была введена система, известная как E-TACS или Extended-TACS увеличивающая число каналов. А в США была разработана другая система, известная как Narrowband AMPS (NAMPS).

### 1.1.1 Структура сети Global System for Mobile Communications

Основными частями системы Global System for Mobile Communications (GSM) являются:

- подсистема базовых станций (BSS - Base Station Subsystem);
- подсистема коммутации (NSS - Network Switching Subsystem);
- мобильная станция, она же «сотовый телефон» (MS - Mobile Station).

Подсистема базовой станции обеспечивает непосредственное соединение с мобильной станцией, а коммутационная подсистема обеспечивает коммутацию соединений между абонентами мобильных станций и абонентов мо-

бильных станций с абонентами телефонных сетей общего пользования и наоборот.

В принципе, изначально сети Global System for Mobile Communications (GSM) разрабатывались в расчете на то, что мобильные станции будут передавать принимать весьма небольшой трафик (голосовая связь, SMS, факсы). Потребность в передаче больших потоков данных вынудило разработчиков внедрить в первоначальный стандарт новую подсистему - GPRS (General Packet Radio Service - пакетная радиосвязь общего пользования) и добавить к первоначальной архитектуре еще один структурный элемент - GPRS Core Network.

Это позволило модернизировать существующие сети и предложить клиентам новые сервисы, связанные с передачей больших потоков цифровых данных: начиная с чтения e-mail мобильного доступа к социальным сетям и заканчивая различными онлайн-сервисами вроде информации о пробках на дорогах в реальном времени.

### **1.1.2 Особенности технологий GPRS и EDGE**

GPRS (General Packet Radio Service - пакетная радиосвязь общего пользования) - надстройка над технологией мобильной связи Global System for Mobile Communications (GSM), осуществляющая пакетную передачу данных, позволяющая работать в сети Internet, используя обычный мобильный телефон. Стандартизация этой технологии началась в 1993 году в European Telecommunication Standards Institute (ETSI - Европейский институт стандартизации электросвязи). С помощью GPRS пользователи могут работать со своей электронной почтой, с обычными Web-серверами. До разработки технологии GPRS абонент оплачивал все время соединения независимо от того, использовал ли он установленный канал передачи данных. Основное преимущество GPRS-сетей состоит в том, что пользователь оплачивает только объем передаваемой/получаемой информации, а не время нахождения в сети. Иными словами, ресурсы сети задействованы только во время непосредственной передачи данных от телефона. Во время пауз (например, просмотр полученной электронной почты) ресурсы сети предоставляются в распоряжение других абонентов.

Стандарт Global System for Mobile Communications (GSM) с технологией GPRS занимает промежуточное положение между вторым и третьим поколениями связи, поэтому нередко называется 2,5G. Называется он так еще и потому, что GPRS является переходным звеном Global System for Mobile Communications (GSM)/GPRS-сетей к совместимости с UMTS. В GPRS максимально возможная скорость передачи данных составляет 171,2 Кбит/с - это почти в 12 раз быстрее передачи данных в обычных сетях Global System for Mobile Communications (GSM) (9,6 Кбит/с). Однако на данный момент скорости не так высоки - обычно 30-40 Кбит/с. В настоящее время практически все сотовые операторы предлагают своим абонентам услуги GPRS.

### 1.1.3 Принцип работы GPRS

При использовании GPRS информация собирается в пакеты и передается через неиспользуемые в данный момент голосовые каналы. Такая технология предполагает более эффективное использование ресурсов сети Global System for Mobile Communications (GSM). При этом оператор связи выбирает приоритет передачи: голосовой трафик или передачу данных. Beeline, Tele2, KCell в РК используют безусловный приоритет голосового трафика перед данными, поэтому скорость передачи зависит не только от возможностей оборудования, но и от загрузки сети. Возможность использования сразу нескольких каналов обеспечивает достаточно высокие скорости передачи данных, теоретический максимум при всех занятых time-слотах TDMA составляет 171,2 Кбит/с. Существуют различные классы GPRS, различающиеся скоростью передачи данных и возможностью совмещения передачи данных с одновременным голосовым вызовом.

Передача данных разделяется по направлениям downlink, DL- нисходящая линия связи, и uplink, UL – восходящая линия связи. Мобильные терминалы разделяются на классы, которые характеризуют возможности устройства, поддерживающего GPRS.

Класс состоит из двух частей. Первая часть класса указывает на возможности по совместному использованию голосовых и пакетных (GPRS) сервисов.

Class A - позволяет одновременное использование: можно одновременно совершать/принимать вызов и принимать/передавать данные.

Class B - позволяет автоматическое переключение между сессиями: в перерывах между сеансами приёма/передачи данных (даже если сессия не прервана) можно совершать голосовые звонки.

Class C - позволяет использование только одного вида сервиса, применяется в GPRS-модемах.

Вторая часть класса указывает на возможности по скорости обмена данными, так называемые мультислотклассы, по количеству одновременно используемых time-слотов для передачи и приёма данных. Современные телефоны (2006 год) поддерживают до 4-х time-слотов одновременно для приема по линии DL (то есть могут принимать 85 Кбит/с по кодовой схеме CS-4), и до 2-х для передачи по линии UL (Class 10 или 4+2). Те же классы используются и для EGPRS (EDGE).

Абоненту, подключенному к GPRS, предоставляется виртуальный канал, который на время передачи пакета становится реальным, а в остальное время используется для передачи пакетов других пользователей. Поскольку один канал могут использовать несколько абонентов, возможно возникновение очереди на передачу пакетов, и, как следствие, задержка связи. Например, современная версия программного обеспечения контроллеров базовых станций допускает одновременное использование одного time-слота шестнадцатью абонентами в разное время и до 5 (из 8) time-слотов на частоте, итого - до 80 або-



нентов, пользующихся GPRS на одном канале связи (средняя максимальная скорость при этом  $21,4 \cdot 5/80 = 1,3$  Кбит/с на абонента). Другой крайний случай - пакетирование time-слотов в один непрерывный с вытеснением голосовых абонентов на другие частоты (при наличии таковых и с учётом приоритета). При этом телефон, работающий в режиме GPRS, принимает все пакеты на одной частоте и не тратит времени на переключения. В этом случае скорость передачи данных достигает максимально возможной, как и описано выше, 4+2 time-слота (Class 10). Технология GPRS использует GMSK-модуляцию. В зависимости от качества радиосигнала данные, пересылаемые по радиоэффиру, кодируются по одной из 4-х кодовых схем (CS1-CS4). Каждая кодовая схема характеризуется избыточностью кодирования и помехоустойчивостью и выбирается автоматически в зависимости от качества радиосигнала.

#### 1.1.4 Интеграция с Интернет

GPRS по принципу работы аналогична Интернет: данные разбиваются на пакеты и отправляются получателю (необязательно одним и тем же путем), где происходит их сборка. При установлении сессии каждому устройству присваивается уникальный адрес, что по сути превращает его в сервер. Протокол GPRS прозрачен для TCP/IP, поэтому интеграция GPRS с Интернет незаметна конечному пользователю. Пакеты могут иметь формат IP или X.25, при этом не имеет значения, какие протоколы используются поверх IP, поэтому есть возможность использования любых стандартных протоколов транспортного и прикладного уровней, применяемых в Интернет (TCP, UDP, HTTP, HTTPS, SSL, POP3, Jabber и др.) [1]. Также при использовании GPRS мобильный телефон выступает как клиент внешней сети, и ему присваивается IP-адрес (постоянный или динамический).

Технология EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) - предоставляет улучшенные скорости передачи данных для эволюции Global System for Mobile Communications (GSM) стандарта. Из названия технологии можно сделать вывод о следующем: во-первых, она обеспечивает более высокую пропускную способность для передачи и приема данных, а во-вторых, служит еще одним шагом на пути от Global System for Mobile Communications (GSM) к UMTS. Первый шаг - внедрение GPRS, уже сделан. Не за горами и второй шаг - внедрение EDGE уже началось в мире и в нашей стране. Впервые EDGE была представлена ETSI (Европейский институт стандартизации электросвязи) в начале 1997 года в качестве эволюции существующего стандарта Global System for Mobile Communications (GSM). EDGE использует ту же полосу пропускания и структуру временных слотов, что и Global System for Mobile Communications (GSM) [7]. Таким образом, оператор может продолжать использовать уже имеющиеся диапазоны частот по 200 кГц, структуру каналов и частотные планы, при этом предлагая своим абонентам ряд услуг третьего поколения. Более того, использующийся в EDGE формат пакета полностью идентичен аналогичному пакету в TDMA или Global System for

Mobile Communications (GSM). Он включает тестовую последовательность из 26 символов в центре пакета, две хвостовые последовательности из трех символов с каждого конца пакета, две последовательности с данными по 58 символов и контрольную последовательность из 8.25 символов.

Технология EDGE может внедряться двумя разными способами: как расширение GPRS, в этом случае ее следует называть EGPRS (enhanced GPRS) или как расширение CSD (ECSD). Учитывая, что GPRS распространена намного шире, чем HSCSD, остановимся на рассмотрении EGPRS.

EGPRS не является новым стандартом сотовой связи. Однако, EDGE подразумевает дополнительный физический уровень, который может быть использован для увеличения пропускной способности сервисов GPRS или HSCSD. При этом, сами сервисы предоставляются точно так же, как и раньше. Теоретически, сервис GPRS способен обеспечивать пропускную способность до 160 Кбит/с (на физическом уровне, на практике же поддерживающие GPRS Class 10 или 4+1/3+2 аппараты обеспечивают лишь до 38-42 Кбит/с и то, если позволяет загруженность сети сотовой связи), а EGPRS - до 384-473,6 Кбит/с. Для этого необходимо использование инновационной модуляционной схемы, новых методов кодирования каналов и коррекции ошибок.

EDGE, по сути, является "надстройкой" (вернее, подстройкой, если считать, что физический уровень находится ниже остальных) к GPRS и не может существовать отдельно от GPRS. EDGE, как уже было сказано выше, подразумевает использование других модуляционных и кодовых схем, сохраняя совместимость с CSD-сервисом голосовой связи.

Таким образом, с точки зрения клиентского терминала, с внедрением EDGE не должно измениться ничего. Однако, инфраструктура базовой станции претерпит некоторые изменения, хотя и не такие уж серьезные. Помимо увеличения пропускной способности для передачи данных, внедрение EDGE увеличивает емкость сети сотовой связи: в один и тот же time-слот можно теперь "упаковать" большее количество пользователей, соответственно, можно надеяться не получать сообщение "сеть занята" в самые неподходящие моменты.

## **1.2 Третье поколение связи (3G)**

В настоящее время технологии 3G прочно завоевали позиции в большинстве стран мира и в крупных городах Казахстана в том числе. Это произошло благодаря реализации стандартов мобильной связи: обеспечение качества передачи речи, а также безопасности, сравнимых с качеством передачи в проводных сетях; обеспечение национального и международного роуминга; поддержка местных и международных операторов; эффективное использование спектра частот; пакетная и канальная коммутация; поддержка многоуровневых сотовых структур; взаимодействие с системами спутниковой связи; поэтапное наращивание скорости передачи данных вплоть до 2 Мбит/с.

3G (от англ. third generation - третье поколение), технологии мобильной связи 3 поколения - набор услуг, который объединяет как высокоскоростной мобильный доступ с услугами сети Интернет, так и технологию радиосвязи, которая создаёт канал передачи данных [1].

Стандарт UMTS (Universal Mobile Telecommunications System - Универсальная система мобильной связи) нашел наибольшее распространение среди других стандартов этого поколения на территории Европы, России, Казахстана.

Разработка стандарта UMTS началась в 1992 году организацией по стандартизации ITT-2000. Первая сеть UMTS была запущена в коммерческую эксплуатацию 1 декабря 2001 года в Норвегии. К маю 2010 года число абонентов переваливает за 540 миллионов по всему миру [2].

Скорость передачи данных для сетей UMTS может достигать 2 Мбит/с. Благодаря технологии HSDPA-High Speed Downlink Packet Access (3.5G), которая была внедрена в 2006 году максимальная скорость возрасла до 14 Мбит/с. Эти и другие преимущества UMTS позволяют предоставлять абонентам широкий перечень услуг: видеозвонки, видеоконференции, высококачественные голосовые звонки, загрузка файлов с высокой скоростью, сетевые игры, мобильная коммерция и многое другое [2].

Ниже представлена структура сети стандарта UMTS. Где:

MSC (Mobile Switching Center) - коммутатор мобильных сетей связи;

HLR (Home Location Register) – домашний регистр местоположения;

VLR (Visitor Location Register) - гостевой регистр местоположения;

AUC (Authentication Center) – центр аутентификации абонентов;

MGW (Media gateway) – элемент сети сотовой связи стандарта UMTS, предназначенный для коммутации абонентской нагрузки;

RNC (Radio Network Controller) – контроллер сети доступа сотовой связи стандарта UMTS;

SGSN (Serving GPRS Support Node) - узел обслуживания абонентов пакетной сети передачи данных сетей Global System for Mobile Communications (GSM) и UMTS для технологий GPRS, EDGE, HSPA. Это аналог MSC для пакетной сети передачи данных;

GGSN (Gateway GPRS Support Node) – шлюзовой узел поддержки GPRS. GGSN является аналогом G-MSC для пакетной сети и служит для передачи пакетных данных во внешние сети, такие как Интернет для сетей сотовой связи стандартов Global System for Mobile Communications (GSM), UMTS, LTE.

NodeB – базовая станция сети стандарта UMTS. Она отвечает за создание покрытия сети сотовой связи.

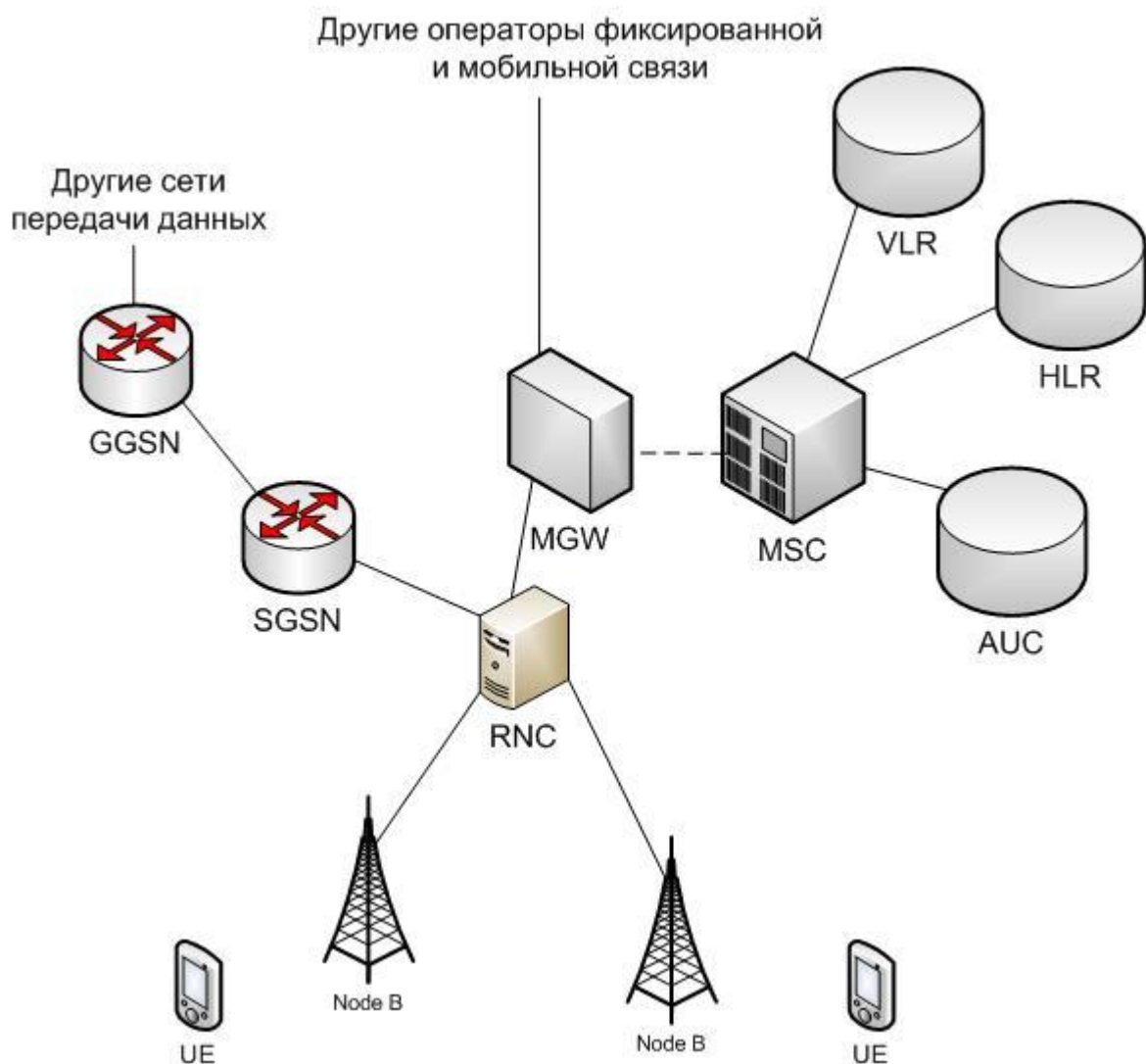


Рисунок 1.1 - Структура сети стандарта UMTS

### 1.3 Четвертое поколение связи (4G)

4G (от англ. fourth generation -четвёртое поколение) - поколение мобильной связи с повышенными требованиями. К четвёртому поколению принято относить перспективные технологии, позволяющие осуществлять передачу данных со скоростью, превышающей 100 Мбит/с подвижным и 1 Гбит/с - стационарным абонентам [1].

Стандарты третьего поколения позволяют предоставить широкий перечень мультимедийных услуг и поддерживают скорости передачи данных до 14 Мбит/с. Это вполне соответствует запросам абонентов в настоящее время. Однако, объемы передаваемой информации в телекоммуникационных сетях растут с каждым днем. Чтобы удовлетворить потребности пользователей по скорости передачи данных и набору услуг, хотя бы на 10 лет вперед необходим новый стандарт, уже четвертого поколения [2].

Работа над одним из стандартов четвертого поколения - LTE (Long Term Evolution) началась в 2004 году организацией 3GPP. Главными требованиями, которые предъявлялись в процессе работы над стандартом были следующие:

- скорость передачи данных выше 100 Мбит/с;
- высокий уровень безопасности системы;
- высокая энергоэффективность;
- низкие задержки в работе системы;
- совместимость со стандартами второго и третьего поколений.

В конце 2009 года в Швеции была запущена в коммерческую эксплуатацию первая сеть стандарта LTE.

Сети LTE поддерживают скорость передачи данных до 326,4 Мбит/с. К примеру, загрузка фильма в хорошем качестве займет менее одной минуты. Таким образом, верхняя планка по скорости передачи данных практически снимается [2].

Рассмотрим структуру сети LTE:

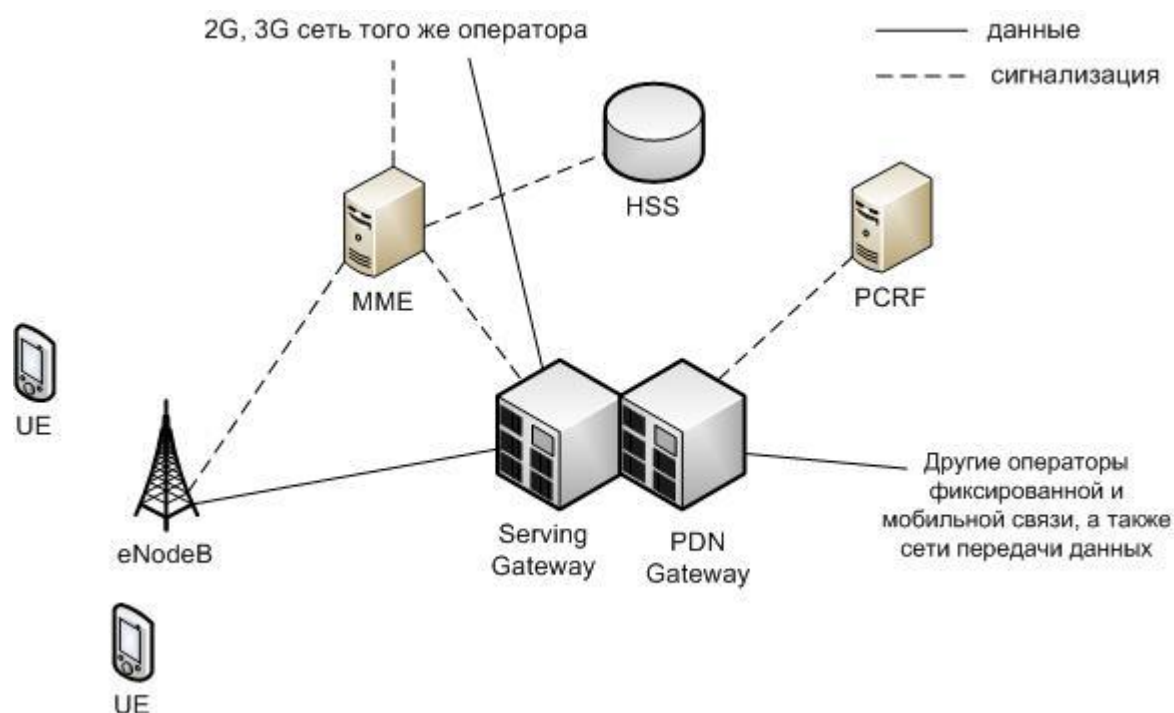


Рисунок 1.2 - Структура сети стандарта LTE

Из рисунка 1.2 видно, что структура сети сильно отличается от рассмотренных ранее стандартов 2G и 3G. Существенные изменения претерпела и подсистема базовых станций, и подсистема коммутации. Была изменена технология передачи данных между оборудованием пользователя и базовой станцией. Также подверглись изменению и протоколы передачи данных между сетевыми элементами. Вся информация (голос, данные) передается в виде пакетов. Таким образом, уже нет деления на части обрабатывающие либо только голосовую информацию, либо только пакетные данные [2].

MME (Mobility Management Entity) – узел управления мобильностью сети сотовой связи стандарта LTE. Предназначен для обработки сигнализации, преимущественно связанной с управлением мобильностью абонентов в сети.

HSS (Home Subscriber Server) - сервер абонентских данных сети сотовой связи стандарта LTE. Представляет собой большую базу данных и предназначен для хранения данных об абонентах. HSS фактически заменяет набор регистров (VLR, HLR, AUC, EIR), которые использовались в сетях 2G и 3G.

PCRF (политика и правила зарядки Функция) - элемент сети сотовой связи стандарта LTE, отвечающий за управление начислением платы за оказанные услуги связи, а также за качество соединений в соответствии с заданными конкретному абоненту характеристиками.

eNodeB (eNB) – базовая станция сети стандарта LTE. Она является аналогом NodeB для сети UMTS и BTS для сети Global System for Mobile Communications (GSM). Основной задачей eNodeB является преобразование сигнала пришедшего от SGW в высокочастотный сигнал и передать его через секторные антенны (антенну). Именно eNodeB отвечает за покрытие сети LTE и является шлюзом между абонентским терминалом и сетью LTE.

PDN GW (Public data network Gateway, PGW) – шлюз к другим сетям передачи данных для сети LTE. Основная задача PGW заключается в маршрутизации трафика сети LTE к другим сетям передачи данных, таких как Интернет, а также сетям Global System for Mobile Communications (GSM), UMTS.

Serving GW (Serving Gateway, SGW) – обслуживающий шлюз сети стандарта LTE. SGW является шлюзом между CN (Core Network) и сетью доступа. Serving GW по сути является маршрутизатором между сетями, но выполняет также ряд специфических функций.

### **1.3.1 Принципы построения радиointерфейса в LTE**

LTE базируется на трех основных технологиях: мультиплексирование посредством ортогональных несущих OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), многоантенные системы MIMO (Multiple Input Multiple Output) и эволюционная системная архитектура сети (System Architecture Evolution).

Принципиально, что дуплексное разделение каналов может быть как частотным (FDD), так и временным (TDD). Это позволяет операторам очень гибко использовать частотный ресурс. Такое решение открывает путь на рынок тем компаниям, которые не обладают спаренными частотами. С другой стороны, поддержка FDD очень удобна для традиционных сотовых операторов, поскольку у них спаренные частоты есть «по определению» – так организованы практически все существующие системы сотовой связи. Сама же по себе система FDD существенно более эффективна в плане использования частотного ресурса, чем TDD, – в ней меньше накладных расходов (служебных полей, интервалов и т.п.).

Обмен между базовой станцией (БС) и мобильной станцией (МС) строится по принципу циклически повторяющихся кадров (в терминологии LTE –

радиокадра). Длительность радиокadra – 10 мс. Все временные параметры в спецификации LTE привязаны к минимальному временному кванту  $T_s = 1 / (2048 \cdot \Delta f)$ , где  $\Delta f$  – шаг между поднесущими, стандартно – 15 кГц. Таким образом, длительность радиокadra –  $307200T_s$ . Сам же квант времени соответствует тактовой частоте 30.72 МГц, что кратно стандартной в 3G-системах (WCDMA с полосой канала 5 МГц) частоте обработки 3.84 МГц ( $8 \times 3,84 = 30,72$ ).



Рисунок 1.3 - Структура кадра LTE при частотном разделении дуплексных каналов

Стандарт LTE предусматривает два типа радиокadров. Тип 1 предназначен для частотного дуплексирования – как для полного дуплекса, так и для полудуплекса. Такой кадр состоит из 20 слотов (длительностью 0,5 мс), нумерованных от 0 до 19. Два смежных слота образуют субкадр. При полнодуплексном режиме радиокadры в восходящем и нисходящем каналах передаются параллельно, но с оговоренным в стандарте временным сдвигом.

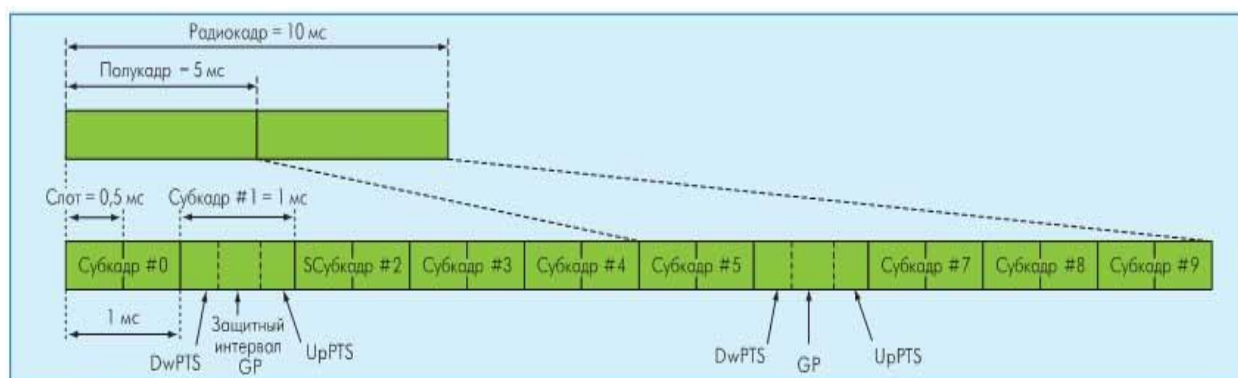


Рисунок 1.4 - Структура кадра LTE при временном разделении дуплексных каналов

Радиокadra типа 2 (Рисунок 1.4) предназначен только для временного дуплексирования. Он состоит из двух полукадров длительностью по 5 мс. Каждый полукадр включает 5 субкадров длительностью 1 мс. Стандарт предусматривает два цикла временного дуплексирования – 5 и 10 мс. В первом случае 1-й и 6-й субкадры идентичны и содержат служебные поля DwPTS, UpPTS и защитный интервал GP. При 10-мс цикле TDD 6-й суб-

кадр используется для передачи данных в нисходящем канале. Субкадры 0 и 5, а также поле DwPTS всегда относятся к нисходящему каналу, а субкадр 2 и поле UpPTS – к восходящему. Распределение остальных субкадров определяется (таблица 1.4.1). Возможно несколько вариантов длительности полей DwPTS, UpPTS и GP, но их сумма всегда равна 1 мс.

Таблица 1.1 - Распределение субкадров в радиокадре типа 2

Конфигурация	Цикл TDD, мс	Номер субкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

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

Как уже отмечалось, в LTE используется модуляция OFDM, хорошо исследованная в системах DVB, Wi-Fi и WiMAX. Напомним, технология OFDM предполагает передачу широкополосного сигнала посредством независимой модуляции узкополосных поднесущих вида

$S_k(t) = \arcsin [2\pi (f_0 + k\Delta f)]$ , расположенных с определенным шагом по частоте  $\Delta f$ . Один OFDM-символ содержит набор модулированных поднесущих.

Во временной области OFDM-символ включает поле данных (полезная информация) и так называемый циклический префикс CP (Cyclic Prefix) – повторно передаваемый фрагмент конца предыдущего символа (Рисунок 1.4.3). Назначение префикса – борьба с межсимвольной интерференцией в приемнике вследствие многолучевого распространения сигнала. Отраженный сигнал, приходящий с задержкой, попадает в зону префикса и не накладывается на полезный сигнал. В LTE принят стандартный шаг между поднесущими  $\Delta f = 15$  кГц, что соответствует длительности OFDM-символа 66.7 мкс.



Рисунок 1.5 - OFDM-символ с циклическим префиксом

Каждому абонентскому устройству (АУ) в каждом слоте назначается определенный диапазон канальных ресурсов в частотно-временной области (Рисунок 1.4) – ресурсная сетка. Ячейка ресурсной сетки – так называемый ресурсный элемент – соответствует одной поднесущей в частотной области и



одному OFDM-символу – во временной. Ресурсные элементы образуют ресурсный блок – минимальную информационную единицу в канале. Ресурсный блок занимает 12 поднесущих (т.е. 180 кГц) и 7 или 6 OFDM-символов, в зависимости от типа циклического префикса (табл.2) – так, чтобы общая длительность слота составляла 0,5 мс. Число ресурсных блоков NRB в ресурсной сетке зависит от ширины полосы канала и составляет от 6 до 110 (ширина частотных полос восходящего/нисходящего каналов в LTE – от 1,4 до 20 МГц). Ресурсный блок – это минимальный ресурсный элемент, выделяемый абонентскому устройству планировщиком базовой станции. О распределении ресурсов в каждом слоте базовая станция сообщает в специальном управляющем канале.

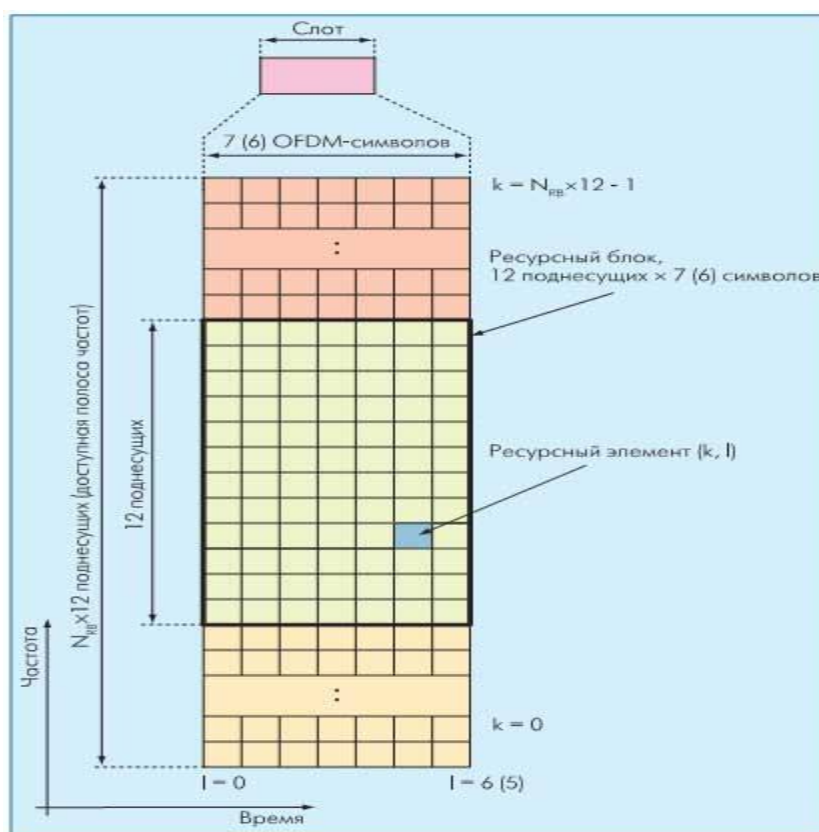


Рисунок 1.6 - Ресурсная сетка LTE при стандартном шаге поднесущих  $\Delta f=15$  кГц

Длительность префикса 4,7 мкс позволяет бороться с задержкой отраженного сигнала, прошедшего путь на 1,4 км больше, чем прямо распространяющийся сигнал. Для систем сотовой связи в условиях города этого обычно вполне достаточно. Если же нет – используется расширенный префикс, обеспечивающий подавление межсимвольной интерференции в ячейках радиусом до 120 км. Такие огромные ячейки полезны для разного рода широкополосных сервисов (MBMS), таких как мобильное ТВ-вещание. Для этих же режимов (только в нисходящем канале) предусмотрена особая структура сло-

та, с шагом между поднесущими 7.5 кГц и циклическим префиксом 33.4 мкс. В слоте при этом всего три OFDM-символа. Особый случай широковещательного сервиса представляет режим MBSFN (мультимедийный широковещательный сервис для одночастотной сети). В этом режиме несколько БС в определенной MBSFN - зоне одновременно и синхронно транслируют общий широковещательный сигнал.

Таблица 1.2- Физический префикс в нисходящем канале при  $\Delta f = 15\text{кГц}$

Тип префикса	Длина префикса		Длина слота, OFDM-символов
	$T_s$	мкс	
Стандартный:			7
первый символ слота	160	5,2	
остальные 6 символов слота	144	4,7	
Расширенный	512	16,7	6

Каждая поднесущая модулируется посредством 4-, 16- и 64-позиционной квадратурной фазово-амплитудной модуляции (QPSK, 16-QAM или 64-QAM). Соответственно, один символ на одной поднесущей содержит 2, 4 или 6 бит. При стандартном префиксе символьная скорость составит 14000 символов/с, что соответствует, при FDD-дуплексе, агрегатной скорости от 28 до 84 кбит/с на поднесущую. Сигнал с полосой 20 МГц содержит 100 ресурсных блоков или 1200 поднесущих, что дает общую агрегатную скорость в канале от 33,6 до 100,8 Мбит/с.

Спецификации LTE определяют несколько фиксированных значений для ширины восходящего и нисходящего каналов между БС и АС (в сетях E-UTRA) (таблица 3). Поскольку в OFDM используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), число формальных поднесущих для упрощения процедур цифровой обработки сигнала должно быть кратно  $N = 2n$  (т.е. 128, 256, ..., 2048). При этом частота выборок должна составлять  $F_s = \Delta f \cdot N$ . При заданных в стандарте значениях она оказывается кратной 3,84 МГц – стандартной частоте выборок в технологии WCDMA. Это очень удобно для создания многофункциональных устройств, поддерживающих как WCDMA, так и LTE.

Таблица 1.3 - Параметры канала передачи между БС и АС

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

### 1.3.2 Формирование сигнала в нисходящем канале

В нисходящем и восходящем каналах применение технологии OFDM различно. В нисходящем канале эта технология используется не только для передачи сигнала, но и для организации множественного доступа (OFDMA) – т.е. для мультиплексирования абонентских каналов.

Помимо описанного физического структурного блока вводится понятие логического структурного блока. По числу ресурсных элементов они эквивалентны, однако возможно два варианта отображения ресурсных элементов физического блока в логический – один в один и распределено. В последнем случае элементы логического ресурсного блока оказываются распределенными по всей доступной ресурсной сетке.

В отличие от пакетных сетей, в LTE нет физической преамбулы, которая необходима для синхронизации и оценки смещения несущей. Вместо этого в каждый ресурсный блок добавляются специальные опорные и синхронизирующие сигналы. Опорные сигналы могут быть трех видов – опорный сигнал, характеризующий ячейку (Cell-specific), сигнал, связанный с конкретным абонентским устройством, и сигнал для специального широковещательного мультимедийного сервиса MBSFN. Опорный сигнал служит для непосредственного определения условий в канале передачи (поскольку приемнику известно его месторасположение и исходная форма). На основе этих измерений можно определить реакцию канала для остальных поднесущих и с помощью интерполяции восстановить их исходную форму.

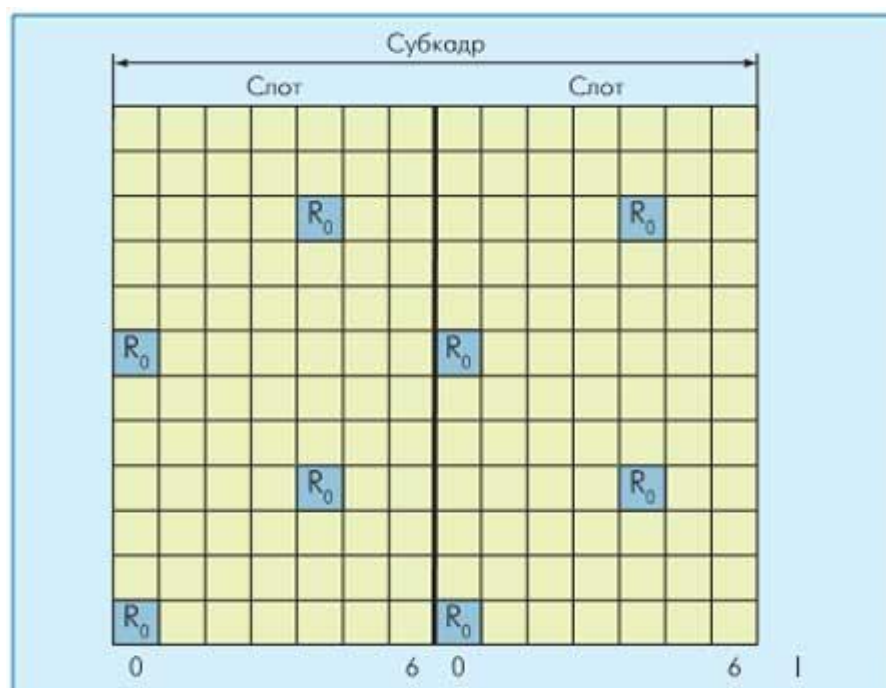


Рисунок 1.7 - Расположение опорного сигнала (cell-specific) в нисходящем канале ресурсной сетки LTE в случае работы с одной антенной

Опорный cell-specific-сигнал должен присутствовать в каждом субкадре нисходящего канала (кроме случаев MBSFN-передачи). Форма сигнала определяется на основе псевдослучайной последовательности Голда (вариант m-последовательности), при инициализации которой используется идентификационный номер ячейки БС (Cell ID). Такой опорный сигнал равномерно распределен по ресурсным элементам (рис. 7). Так, при стандартной длине префикса он транслируется в 0-м и 4-м OFDM-символе, при расширенном CP – во время 0-го и 3-го OFDM-символа. В частотной области опорные сигналы передаются через каждые шесть поднесущих, причем смещение определяется идентификатором ячейки, взятым по модулю.

Помимо опорных сигналов, в нисходящем канале транслируются и синхронизирующие сигналы. Синхронизирующие сигналы также однозначно определяют Cell ID. В LTE принята иерархическая структура идентификации ячейки, как и в предшествующей ей технологии WCDMA. Предполагается, что на физическом уровне доступно 504 Cell ID. Они разбиты на 168 ID-групп, по три идентификатора в каждой. Номер группы N1 (0–167) и номер идентификатора в ней N2 (0–2) однозначно определяют ID ячейки. Используется два синхросигнала – первичный и вторичный. Первичный синхросигнал представляет собой 62-элементную последовательность в частотном плане, задаваемую последовательностью на основе идентификатора N2. Такая последовательность из 62 поднесущих, распределенных по ресурсной сетке симметрично относительно ее центральной частоты, передается в радиокадре типа 1 в последнем OFDM-символе слотов 0 и 10 (субкадры 0 и 5) [3].

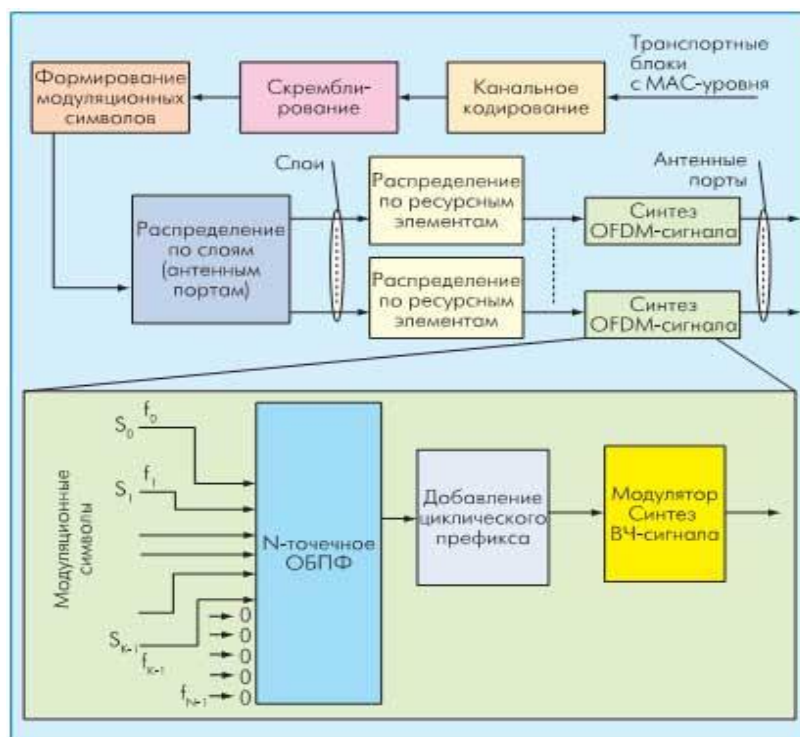


Рисунок 1.8 - Схема формирования сигнала в нисходящем канале

В радиокадре типа 2 для передачи первичного синхросигнала используется третий OFDM-символ субкадров 1 и 6. Вторичный синхросигнал генерируется на основе номера ID-группы N1. Он передается в слотах 0 и 10 радиокадра типа 1 (пятый OFDM-символ при стандартном CP) и в слотах 1 и 11 радиокадра типа 2 (шестой OFDM-символ при стандартном CP).

Формирование сигнала в нисходящем канале достаточно стандартно для современных систем цифровой передачи информации (рис. 8). Оно включает процедуры канального кодирования, скремблирования, формирования модуляционных символов, их распределения по антенным портам и ресурсным элементам и синтеза OFDM-символов. Канальное кодирование подразумевает вычисление контрольных сумм (CRC-24) для блоков данных, поступающих с MAC-уровня. Затем блоки с контрольными суммами обрабатываются посредством кодера со скоростью кодирования 1/3. В LTE предусмотрено применение либо сверточного кода, либо турбо-кода. Кодированная последовательность после перемежения (интерливинга) поступает в скремблер (для входной последовательности  $\{x(i)\}$  выполняется процедура вида  $dscr(i) = x(i) + c(i)$ , где  $c(i)$  – определенная скремблирующая последовательность). Затем формируются комплексные модуляционные символы (QPSK, 16- и 64-QAM) и распределяются по ресурсным элементам. Далее происходит синтез OFDM-символов, их последовательность поступает в модулятор, формирующий выходной ВЧ-сигнал в заданном частотном диапазоне. На стороне приема все процедуры выполняются в обратном порядке [3].

### 1.3.3 Формирование сигнала в восходящем канале

Применение OFDM в сочетании с циклическим префиксом делает связь устойчивой к временной дисперсии параметров радиоканала, в результате на приемной стороне становится не нужным сложный эквалайзер. Это очень полезно для организации нисходящего канала, поскольку упрощается обработка сигнала приемником, что снижает стоимость терминального устройства и потребляемую им мощность.

В восходящем канале допустимая мощность излучения значительно ниже, чем в нисходящем. Поэтому первичным становится энергетическая эффективность метода передачи информации с целью увеличения зоны покрытия, снижения стоимости терминального устройства и потребляемой им мощности.

Основной недостаток технологии OFDMA – высокое соотношение пиковой и средней мощности сигнала (PAR). Это связано с тем, что во временной области спектр OFDM-сигнала становится аналогичным гауссову шуму, характеризующемуся высоким PAR. Кроме того, сама по себе технология OFDMA, с учетом необходимости минимизировать шаг между поднесущими и сокращать относительную длительность CP, предъявляет очень высокие требования к формированию композитного сигнала. Мало того, что частотные рассогласования между передатчиком и приемником и фазовый шум в принимаемом сигнале могут привести к межсимвольной интерференции на

отдельных поднесущих (т.е. к интерференции между сигналами различных абонентских каналов). При малом шаге между поднесущими к аналогичным последствиям может привести и эффект Доплера, что очень актуально для систем сотовой связи, предполагающих высокую мобильность абонентов.

В связи с этим для восходящего канала LTE была предложена новая технология - SC-FDMA (Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access). Принципиальное ее отличие: если в OFDMA на каждой поднесущей одновременно передается свой модуляционный символ, то в SC-FDMA поднесущие модулируются одновременно и одинаково, но модуляционные символы короче. То есть в OFDMA символы передаются параллельно, в SC-FDMA – последовательно. Такое решение обеспечивает меньшее отношение максимального и среднего уровней мощности по сравнению с использованием обычной модуляции OFDM, в результате чего повышается энергоэффективность абонентских устройств и упрощается их конструкция (существенно снижаются требования к точности частотных параметров передатчиков).

Структура SC-FDMA-сигнала во многом аналогична технологии OFDM. Так же используется композитный сигнал – модуляция множества поднесущих, расположенных с шагом  $\Delta f$ . Принципиальное отличие в том, что все поднесущие модулируются одинаково, т.е. единовременно передается только один модуляционный символ.

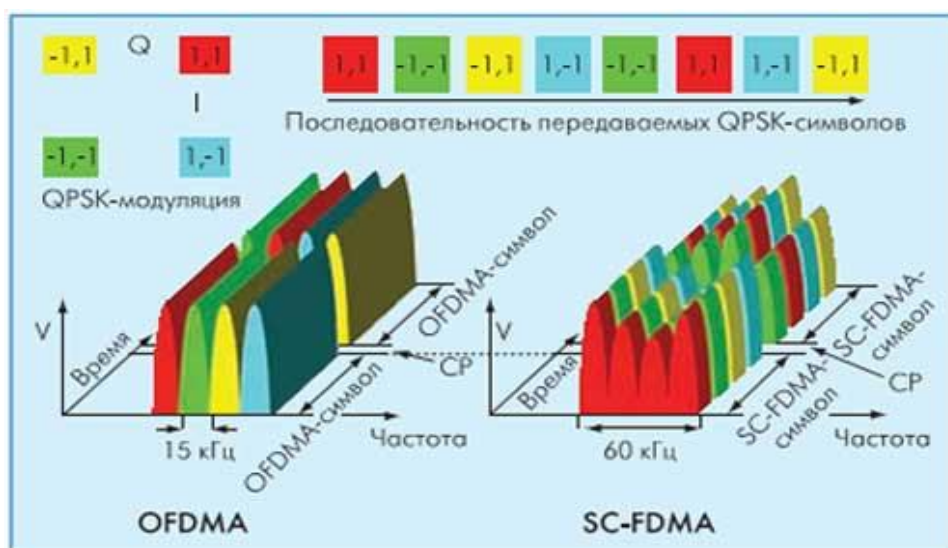


Рисунок 1.9 - Различие между OFDMA и SC-FDMA при передаче последовательности QPSK-символов

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

сти OFDMA-символа и составляет 66.7 мкс (длительности соответствующих циклических префиксов также равны). В сетке может быть от 6 до 110 ресурсных блоков, но их число должно быть кратно 2, 3 или 5, что связано с процедурой дискретного Фурье-преобразования. Еще одна особенность АС – поддержка модуляции 64-QAM опционно

Каждому абоненту сети для передачи данных от базовой станции с помощью функции планирования на определенное время выделяется определенное число ресурсных блоков. Расписание передается абонентам по служебным каналам в нисходящем радиоканале.

Однако если при OFDMA один модуляционный символ (QPSK, 16- или 64-QAM) соответствует OFDM-символу на одной поднесущей (15 кГц, 66.7 мкс), то при SC-OFDMA ситуация иная. В частотном плане ширина модуляционного символа оказывается равной всей доступной полосе частот (он передается на всех поднесущих одновременно). При этом один SC-FDMA-символ содержит несколько модуляционных символов (в идеале столько же, сколько поднесущих), но в соответствующее число раз более коротких по сравнению с OFDMA, что полностью отвечает условиям теоремы Котельникова-Шеннона.

Сама процедура формирования SC-FDMA-сигнала отличается от схемы OFDMA. После канального кодирования, скремблирования и формирования модуляционных символов они группируются в блоки по  $M$  символов – субсимволов SC-FDMA (рис. 10). Очевидно, что непосредственно отнести их на поднесущие с шагом 15 кГц невозможно – требуется в  $N$  раз более высокая частота, где  $N$  – это число доступных для передачи поднесущих. Поэтому, сформировав группы по  $M$  модуляционных символов ( $M < N$ ), их подвергают  $M$ -точечному дискретному Фурье-преобразованию (ДПФ), т.е. формируют аналоговый сигнал. А уже затем с помощью стандартной процедуры обратного  $N$ -точечного Фурье-преобразования синтезируют сигнал, соответствующий независимой модуляции каждой поднесущей, добавляют циклический префикс и генерируют выходной ВЧ-сигнал. В результате такого подхода передатчик и приемник OFDMA- и SC-FDMA-сигналов имеют схожую функциональную структуру.

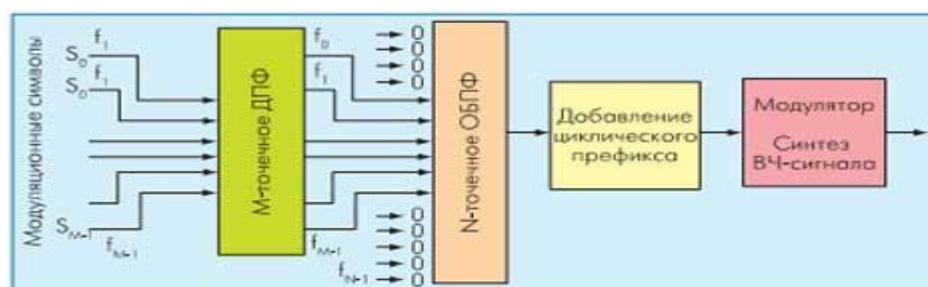


Рисунок 1.10 - Особенность формирования выходного сигнала в случае SC-FDMA

Отметим, что АС может использовать как фиксированный частотный диапазон (используются смежные ресурсные блоки, т.е. смежные поднесущие), так и распределенный – так называемый режим скачкообразной перестройки частоты (FHSS). В последнем случае для каждого слота восходящего канала используется новый ресурсный блок из доступной ресурсной сетки. Параметры перестройки частоты задаются сетевым оборудованием и сообщаются как при инициализации абонентской станции в сети, так и по ходу работы в канале управления. В случае распределенного способа информация от каждого абонента расположена во всем спектре сигнала (рис.11), поэтому данный способ устойчив к частотно-избирательному замиранию. С другой стороны, при локализованном способе распределения, возможно определить полосу в которой для данного абонента достигается максимальная устойчивость канала к замираниям. Поскольку области замирания сигнала для всех абонентов различны, то можно достичь максимальной эффективности использования радиоканала. Однако это требует непрерывного сканирования частотной характеристики канала для каждого устройства и организации функции диспетчеризации.

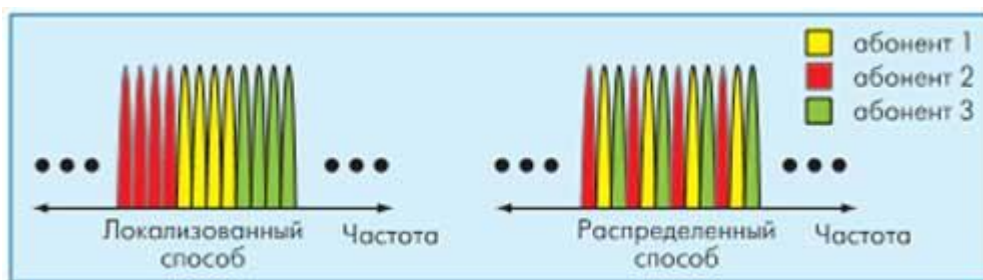


Рисунок 1.11 - Способы распределения поднесущих в SC-FDMA

Помимо собственно информации, генерируемой функциями верхних уровней, в восходящем канале передаются опорные сигналы. Их назначение – помочь приемнику БС настроиться на определенный передатчик АС. Кроме того, эти сигналы позволяют оценить качество канала, что используется в БС при диспетчеризации ресурсов. Опорные сигналы в восходящем канале бывают двух видов – так называемые «демодулированные» и зондовые (sounding). Демодулированные опорные сигналы аналогичны опорным сигналам нисходящего канала. Они передаются на постоянной основе. Так, в общем информационном канале последовательность демодулированного опорного сигнала передается в четвертом SC-FDMA-символе каждого слота при стандартном CP. Зондовые сигналы аперриодичны. Их основное назначение – дать БС возможность оценить качество канала, если передача еще не ведется.



## 1.4 Сравнение и анализ технологий трех поколений связи



Рисунок 1.12 – Временной цикл стандартов сотовой связи

Прослеживаются четкие циклы между сменами поколений сотовой связи – порядка 10 лет. Такой срок прошел при переходе от 2G/ Global System for Mobile Communications (GSM) к 3G/UMTS. 9 лет прошло между стандартизацией 3G/UMTS и 4G/LTE. Примерно столько же – между внедрениями сетей по этим технологиям. Не является ли такая цикличность указанием на то, что в скором времени следует ожидать появления технологии сотовой связи следующего поколения? Условно назовем его – поколением X.



Рисунок 1.13 – Статистика изменения скорости передачи данных

Тенденции в росте пропускной способности также указывают на то, что есть некоторая закономерность. Каждому последующему поколению радиодо-

стуга соответствует рост пиковых скоростей примерно на порядок. Например, при переходе от 2G к 3G/UMTS скорости выросли с 200 Кбит/с до 2 Мбит/с. В 4G/LTE пиковые скорости уже порядка 100 Мбит/с. В LTE Advanced ожидаем пиковых скоростей примерно в 100 Мбит/с. Не означает ли это, что в следующем поколении пиковые скорости достигнут порядка 10 Гбит/с?

Конечно, при этом средние скорости примерно на порядок ниже. Но и здесь четко заметна тенденция. Если в 3G/HSPA средняя скорость в соте в городских условиях составляла 2-3 Мбит/с (варьируется от размера соты, от количества абонентов, от нагрузки в сети), в LTE средние скорости – это десятки Мбит/с. В LTE-Advanced результаты моделирования показывают средние скорости порядка сотен Мбит/с. Не означает ли это, что в сетях следующего поколения, примерно лет через 10, средние скорости будут составлять порядка 1 Гбит/с на сектор, на несущую?



Рисунок 1.14 – Требования для достижения пиковой скорости

Каким образом могут быть получены требуемые пиковые скорости? Давайте условимся, что мы говорим о 10 Гбит/с. Это или расширение каналов, такие скорости достижимы в каналах порядка 200 МГц, или при использовании схем модуляции до 256 QAM. И при повышении порядка MIMO.

В этом примере учитывалась схема MIMO 8x8, которая потенциально позволяет увеличить пропускную способность канала в 8 раз по сравнению с системой 1x1. Естественно, в хороших условиях распространения радиоволн, при высоком отношении сигнал/шум, в малых сотах.

Конечно, уместен вопрос: а возможна ли практическая реализация схем 8x8? Все мы знаем, насколько малыми должны быть терминалы. Можно ли в них уместить 8 модемов? Думаю, что нет. Но можно предположить, что полным ходом будут развиваться технологии multiuser MIMO. Когда доступ к каналу на одних и тех же частотных ресурсах будут осуществлять несколько

пользователей. На одних и тех же абонентских терминалах, оснащенных двумя приемопередающими ветвями.

Как в данном примере можно считать MIMO 8x8? Это 8 антенн на базовой станции, и 4 одновременно работающих абонентских терминала, у каждого из которых по две приемопередающих ветви.

Возможно увеличение схем модуляции до 256 QAM. Естественно, работать это все будет только в хороших условиях приема и при условии, что абонентские терминалы смогут обрабатывать информацию, сигнально-кодированную конструкцию столь высокого порядка. Будут обладать для этого достаточной производительностью.

Отсюда вычитаем 20% заголовков и получаем, что пиковые скорости у нас будут составлять 10 Гбит/с.



Рисунок 1.15 – Технология MIMO

Пока никто не придумал технологии доступа лучше, чем OFDM. Технология, которая позволяет передавать высокоскоростные данные, позволяет работать с каналами большой ширины. И при этом очень эффективно справляется с многолучевостью. Не подвержена частотно-селективным замираниям, поскольку информационные потоки разбиваются на отдельные подпотоки и передаются на отдельных поднесущих. И в пределах каждой поднесущей у нас замирания есть, но они не частотно-селективные.

Комплиментарной парой к технологии OFDM идет технология MIMO. Технологию MIMO практически невозможно реализовать в системах с радиодоступом CDMA, канал передается на одной несущей большой ширины. Перед тем, как заниматься обработкой сигнала MIMO, его необходимо вначале эквализировать. Канал большой ширины, эквализировать его достаточно сложно. Нужны большие вычислительные ресурсы, тратится на это большой процессорный ресурс. И результат, в общем-то, не очень хороший. Это приво-

дит к увеличению сложности абонентских терминалов. В данный момент в мире есть только две сети CDMA, которые используют технологию MIMO. С OFDM технология MIMO работает прекрасно. Всем хороша технология OFDM, но есть один недостаток. Сети, работающие с OFDM предусматривают использование одной и той же частоты по всей сети. Все базовые станции работают на одной и той же частоте. Это означает, что на краях сот очень высокий уровень помех, очень низкое отношение сигнал/шум.

Низкое отношение сигнал/шум – низкая пропускная способность. В сетях LTE, в сетях, работающих на одной частоте, возникает огромная разница в пропускной способности в центре соты и на краях соты.

Основным направлением в разработке сетей следующих поколений, возможно, станет выравнивание возможностей работы абонентов по всей площади сети. Как это можно было бы сделать?

Итак, в нашем базовом сценарии (фрагмент рисунка слева) – средняя скорость в центре соты и по краям соты значительно отличается. Часть пользователей недополучают заявленные для них гарантированные ресурсы. Но если применить некоторые схемы MIMO и процедуры скоординированной связи, можно улучшить работу абонентских терминалов на краях соты.

Или можно в зонах неуверенного приема по краям сот устанавливать микросоты, уплотняя сеть. Это тоже очень эффективный способ повышения пропускной способности.

Итак, о тех режимах, которые бы помогли выровнять режим работы по площади соты.

Здесь могут использоваться или технологии динамического формирования диаграммы направленности (beamforming), или могут использоваться технологии разнесенной передачи или разнесенного приема (это также варианты MIMO). На картинке показано, как при удвоении числа приемопередатчиков, или при удвоении порядка MIMO, можно получить энергетический выигрыш, как минимум, 3дБ, а то и больше. Чем больше приемных ветвей мы используем, тем больше выигрыш. Причем при увеличении числа приемных ветвей достигается больший выигрыш, чем при увеличении числа передающих ветвей.

По нашим оценкам, при переходе от схемы MIMO 2x2 к схеме 4x2 на краю соты можно получить выигрыш 50%.

И второй вариант уменьшения эффекта внутрисистемных помех или борьбы с этим эффектом, – это скоординированная многоточечная связь (CoMP – coordinated multipoint). Что под этим подразумевается? Подразумевается работа абонентской станции на краю соты одновременно с несколькими базовыми станциями. Или скоординированное между этими базовыми станциями выделение ресурса. Ресурсы пользователю выделяются те, где обеспечивается наивысшее отношение S/N. Наилучшие условия приема обеспечивают наиболее высокую скорость передачи данных.

Повысить производительность на краях соты можно с использованием сот малого радиуса действия – фемтосот, пикосот.

В таблице приведены расчеты, исходя из предела Шеннона, скорости, достижимые на краях сот.

Скорости 2 Гбит/с на краю соты в системе связи следующего поколения будут доступны только при радиусе соты до 50 метров.

На макроуровне при радиусе соты порядка 1 км на краю соты на линии вниз достижимы скорости порядка 1 Мбит/с.

То есть микросотовое покрытие по параметру «скорость на краю соты» имеют явное преимущество.

И еще один интересный момент – бюджет линии 100 дБ соответствует бюджету WiFi. Возникает закономерный вопрос – не разумнее ли для построения малых сот использовать распространенную технологию WiFi. В нашем понимании за этим большое будущее – за использованием технологии WiFi в интересах операторов.

Таким образом сети у нас будут многоуровневые. Будет макроуровень для создания непрерывного покрытия, но не будут гарантированы большие скорости. Будут пикосоты для «закрытия» зон с высокой плотностью абонентов. Будут фемтосоты, будут хотспоты WiFi для создания «точечного» покрытия и для обслуживания абонентов с малой подвижностью. Такой мы видим сеть радиодоступа в будущем.

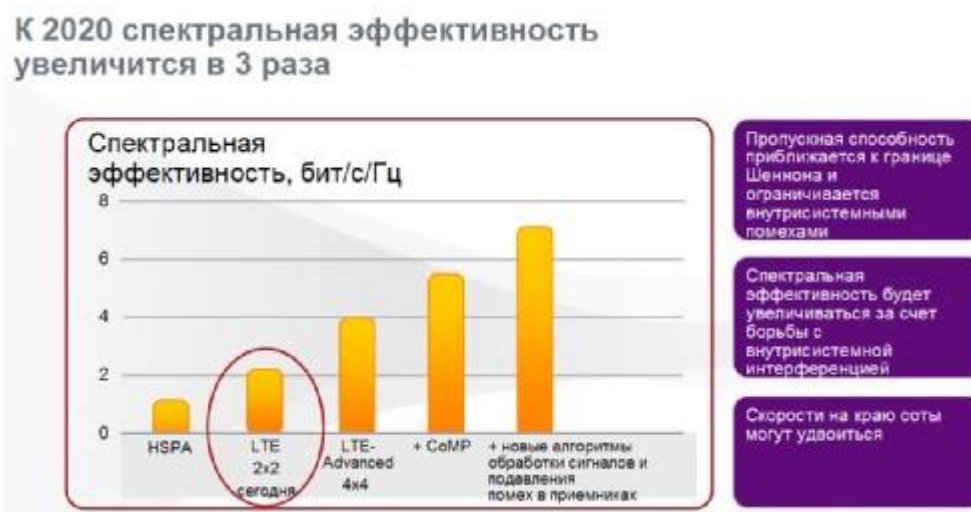


Рисунок 1.16 – Прогноз развития технологий сотовой связи

Если говорить о скоростях передачи, то можно говорить о средней скорости, достижимой в городе. В качестве референсного случая мы рассматриваем микросоты с радиусом порядка 500 метров, работающие в диапазоне выше 2 ГГц.

В LTE сейчас спектральная эффективность системы при использовании MIMO 2x2 составляет порядка 2 бит/с на Гц. Это означает, что в полосе 10 МГц на линии «вниз» средняя скорость при усреднении по всему городу будет составлять порядка 20 Мбит/с.

За счет повышения схем MIMO, за счет использования coordinated multipoint (CoMP) и применения новых алгоритмов обработки сигналов на приемной стороне, в том числе, и алгоритма подавления помех в приемнике, можно будет повысить спектральную эффективность примерно в 3 раза. Вырастет она примерно до 6-7 бит/с на Гц.

Немаловажное значение имеет наличие спектра у оператора, ширина каналов. На рисунке показаны данные на 2010 год, когда для операторов были доступны ресурсы в трех диапазонах частот : 900, 1800 и 2.1 ГГц. То есть в общей сложности на сотовую связь можно было выделить порядка 400 МГц.

По нашим оценкам в ходе стандартизации, высвобождения частотных ресурсов, конверсии спектра, к 2020 году лицензированный спектр составит где-то порядка 1100 – 1200 МГц в диапазонах ниже 6 ГГц.

Кроме того, за счет использования нелицензированного спектра, например, системами Mi-Fi можно повысить в общей сложности спектр, используемый операторами сотовой связи до 1700 МГц. Это примерно 28% от всего спектра ниже 6 ГГц.

Если говорить о производительности цифровых устройств. Уже более 50 лет действует закон Мура. Каждые полтора года удваивается степень концентрации электронных компонентов на кристаллах.

Но достаточно скоро минимальный размер компонентов на кристалле достигнет размеров атома. Казалось бы, закон Мура при этом прекратит свою работу. Но увеличивать производительность, увеличивать число компонентов на кристалле можно и наращивая число процессорных ядер.

Этот закон распространяется и на аппаратные средства сети сотовой связи. По нашим оценкам, если сейчас есть базовые станции с baseband units, со средствами обеспечения производительности 1 Гбит/с, то к 2020 году, а это примерно 7 периодов по 1.5 года ( $2^7 = 128$ ), производительность может вырасти более, чем в 100 раз. Это означает от 1 Гбит/с до 100 Гбит/с на базовую станцию.



Рисунок 1.17 – Хронология развития мобильной связи

Мы приходим к балансу, показанному на картинке. Наши цифровые устройства повысят производительность примерно в 100 раз. У нас будет больше лицензированного спектра, примерно в 3 раза. Спектральная эффективность тоже повышается в три раза. За счет использования, прежде всего, сот малого радиуса действия, у нас повысится число базовых станций, число сот - примерно в 10 раз. С 5 млн до 50 млн по всему миру. В целом мы видим явную тенденцию увеличения трафика, увеличения производительности сетей сотовой связи примерно в 100 раз

Будет ли поколение xG новым поколением или речь пойдет, скорее об эволюционном развитии 4G? Как развивались системы радиодоступа? В 1987 году при выборе Global System for Mobile Communications (GSM) в качестве базовой технологии уже были предложения выбрать CDMA. Тогда остановились на TDMA. При выборе базовой технологии радиодоступа для 3G уже существовала OFDM, но тогда остановились на CDMA. При выборе технологии для реализации 4G/LTE выбрали OFDMA. Но есть ли сейчас какая-то альтернатива? Похоже, нет...

Это приведет к тому, что сейчас и в ближайшем будущем использоваться будет тот же метод радиодоступа. Он, конечно, будет оптимизирован для борьбы с внутрисистемными помехами, для скоординированной связи. Поэтому мы можем условно назвать этот метод связи «скоординированный OFDMA». Какие еще интересные предпосылки есть к появлению новых стандартов. Это конкуренция между технологиями. Когда в 3GPP выбирали технологию 3G, в США трудились над технологией CDMA и она явно была конкурентом.

Когда затем появился WiMAX, в 3GPP умножили усилия по разработке – нужна была аналогичная технология для линейки стандартов 3GPP. Но на этот раз ситуация отличается. Эффективность OFDMA, вероятно, самая высокая на сегодня. И все технологии развиваются сейчас в этом направлении. CDMA переходит на LTE, WiMAX переходит на LTE. Альтернативы практически нет. А как же следующее поколение? Ждать ли революции? В моем понимании, революции не будет, а будет плавное эволюционное развитие технологии радиодоступа.



Рисунок 1.18 – Направление исследований и развития сетей

Фокус, при разработке последующих решений для сотовой связи сместится в сторону обеспечения равномерности радиопокрытия или равномерности качества радиослужб по всей площади сотовой сети. В сторону решений, позволяющих снизить стоимость передачи единицы информации. В сторону улучшения масштабируемости сети, когда одни и те же базовые станции можно будет использовать, как для макросети, так и для микро уровня.

Немаловажное значение имеет энергопотребление. Нужны решения, которые бы позволяли, например, абонентским терминалам дольше работать без подзаряда. Для конечного пользователя очень важны задержки в сети, что особенно важно для ситуаций, когда пользователь работает с потоковыми данными из интернета, например.

Требуется, конечно, обратная совместимость, когда наши новые решения должны будут обеспечивать работу и в сетях предыдущих поколений. Естественно, нужна и спектральная эффективность. Важен и столь любимый некоторыми показатель – пиковая скорость, но это уже не самое главное.

## **2. Экспериментальная часть**

Для того, что бы произвести сравнение характеристик принимаемого сигнала 3-х поколений связи использовался спектрометр. Причем, для сравнения использовались только те показатели, которые влияют на качество связи. Эксперимент проводился в двух частях города, одна из которых является густо населенным участком со множеством построек, маленьких улочек (Бостандыкский район: пр. Абая, ул. Темирязева, ул. Байтурсынова, ул. Ауэзова.), а другой участок является безлюдным парком (Медеуский район: пр. Райымбека, ул. Толе би, ул. Фурманова, ул. Есенберлина).

### **2.1 Используемое оборудование**

Для измерения показателей принимаемого сигнала 3-х поколений сотовой связи использовался спектрометр Rohde & Schwarz FSH4/8/13/20. Этот прибор является анализатором спектра, но в зависимости от установленных опций может измерять мощность, выполнять функции кабельного или антенного тестера, а также двухпортового векторного анализатора электрических цепей. Прибор обеспечивает выполнение трех важнейших функций ВЧ-анализа, необходимых работникам сервисных центров или бригадам, выполняющим пусконаладочные работы или регламентные работы по техническому обслуживанию. Технические характеристики спектрометра следующие:

- Диапазон частот от 9 кГц до 3,6/8 ГГц и 13,6/20 ГГц;
- Высокая чувствительность (менее  $-141$  дБмВт(1 Гц), менее  $-161$ дБмВт);
- Малая погрешность измерения (менее 1 дБ);
- Полосы разрешения от 1 Гц до 3 МГц;
- ПО R&S для простого документирования результатов измерения;
- Двухпортовый анализатор цепей;



- Легкозаменяемая литиево-ионная батарея на 4,5 часа работы;
- Сохранение результатов измерений на SD-карте;
- Прочный брызгозащищенный корпус для работы в полевых условиях;

Сигналы 3-х поколений связи излучала, базовая станция Huawei DBS3900 LTE, которая поддерживает многостандартный режим работы. Она может обслуживает сеть Global System for Mobile Communications (GSM), UMTS и LTE и поддерживает работу по IP транспорту, что является очень важной характеристикой. Может пропускать огромное количество информации через себя.

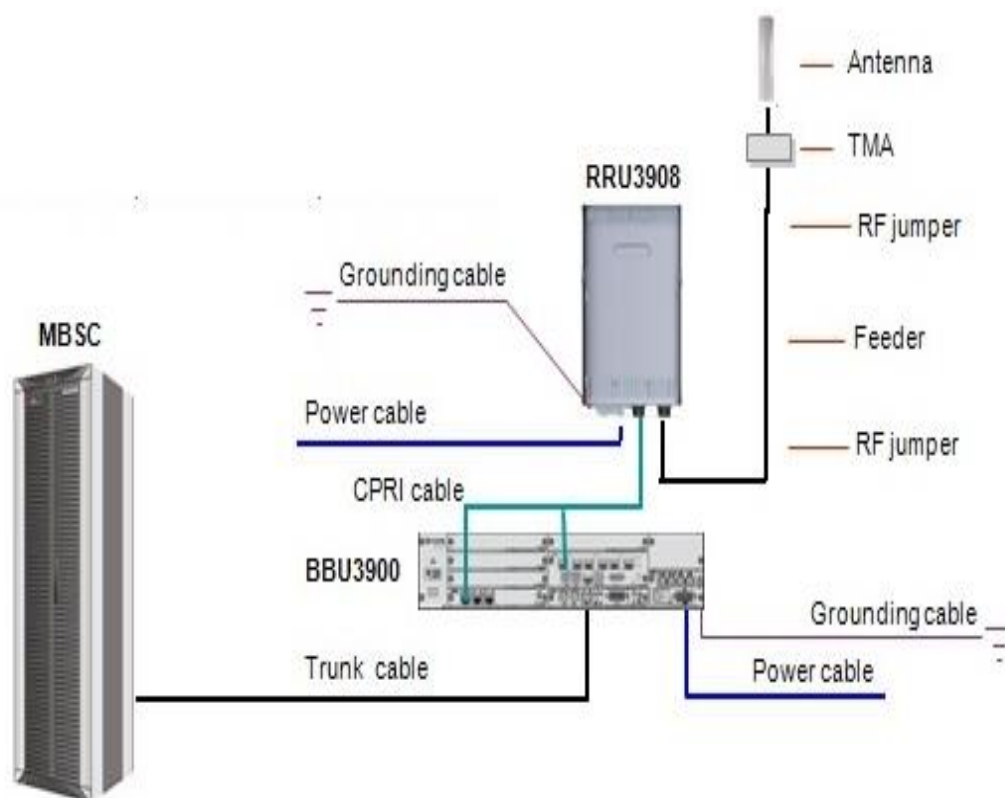


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема Базовой станции DBS3900

Базовая станция DBS3900 состоит из трёх частей:

1. BBU- это основная часть БС (Обрабатывает информацию);
2. RRU- это передатчики TRx;
3. Антенна (Сектор, сота).

Секторы соединяются с RRU коаксиальными кабелями, так называемые джамперы. Блоки RRU размещаются наверху мачты рядом с секторами. Это очень удобно, т.к. раньше на старых базовых станциях передатчики располагались в контейнере на земле, а до секторов прокладывались коаксиальные кабели большого сечения, а это приводило к большим потерям. Блоки RRU со-

единяются с BBU оптическим кабелем. BBU размещается на земле в контейнере и на участке BBU-RRU потери сводятся к нулю, т.к. соединяются по оптике. BBU соединяется с любым транспортным оборудованием (Мультиплексор, RRL оборудование) и далее до контроллера базовых станции BSC6900 (через E1 по АТМ или по IP).

Таблица 2.1 – основные характеристики Huawei DBS3900 LTE

Базовая станции	Huawei DBS3900 LTE	
Характеристики радиопередатчика		
Номер полосы частот	Мин. значение полосы частот	Макс. значение полосы частот
9	2300 МГц	2400 МГц
Рабочие частоты	2300...2400 МГц	
Тип перестройки частоты	Дискретный	
Тип выходного прибора	Полупроводниковый прибор	
Относительная нестабильность частоты		
Класс излучения	18M4G7W	
Номер режима	1	
Характеристики радиоприемника		
Номер полосы частот	Мин. значение полосы частот	Макс. значение полосы частот
10	2300 МГц	2400 МГц
6	2305 МГц	2395 МГц
2	2310 МГц	2400 МГц
8	2302.5 МГц	2397.5 МГц
4	2307.5 МГц	2392.5 МГц
Рабочие частоты	2300...2400 МГц	
Тип приемника	Супергетеродинный	
Характеристики антенны		
Тип антенны	Панельная	
Назначение антенны	Приемопередающая	
Номер антенны	A1	
Частота	2350 МГц	
Коэф. усиления, дБ	18	
Характеристики антенно-фидерного тракта		
Тип фидера	Волноводная секция	
Затухание АФТ на прм. (дБ)	2	
Затухание АФТ на прд. (дБ)	2	

## 2.2 Данные исследования малонаселенной местности

В следующих таблицах и графиках представлены результаты исследования для разных поколений связи.

Таблица 2.2 - Результаты измерений уровня принимаемой мощности и отношения сигнал/шум в малонаселенной местности в течении 12 часов

2G													
Время, ч.	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Уровень принимаемой мощности сигнала, дБм	-71	-74	-66	-73	-72	-70	-63	-79	-69	-63	-78	-65	-69
отношение сигнал/шум, дБ	38	32	34	42	42	37	38	34	40	42	34	34	41
3G													
Время, ч.	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Уровень принимаемой мощности сигнала, дБм	-74	-64	-74	-64	-72	-75	-61	-72	-72	-75	-62	-72	-72
отношение сигнал/шум, дБ	40	32	32	34	31	35	33	42	40	39	36	35	33
4G													
Время, ч.	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Уровень принимаемой мощности сигнала, дБм	-35	-34	-47	-50	-56	-33	-42	-33	-58	-45	-39	-61	-49
отношение сигнал/шум, дБ	42	38	30	34	36	34	36	30	35	39	41	33	34

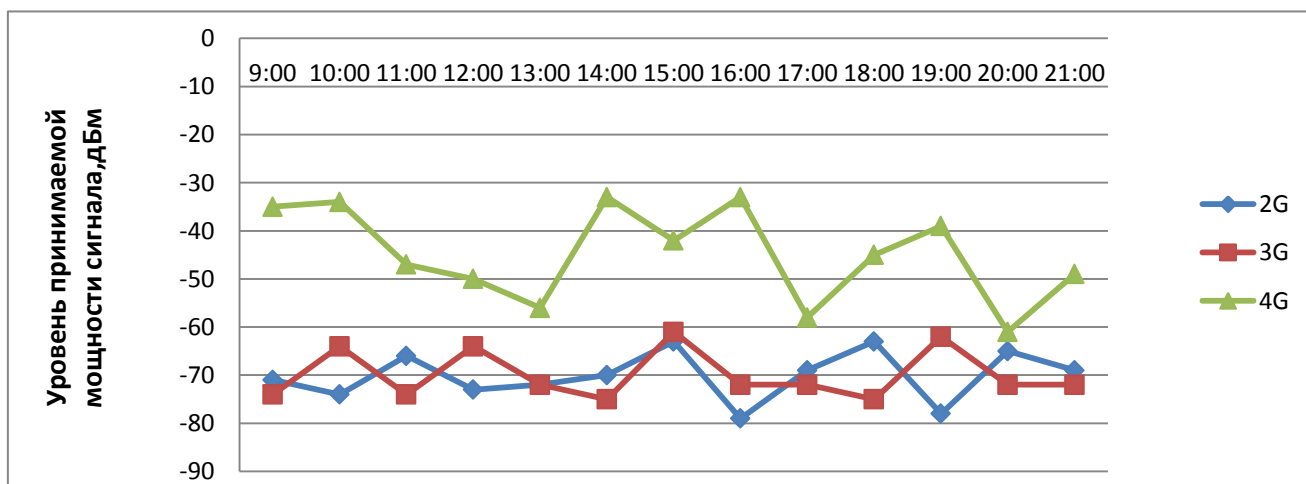


Рисунок 2.2 – Уровни принимаемой мощности сигнала в малонаселенной местности

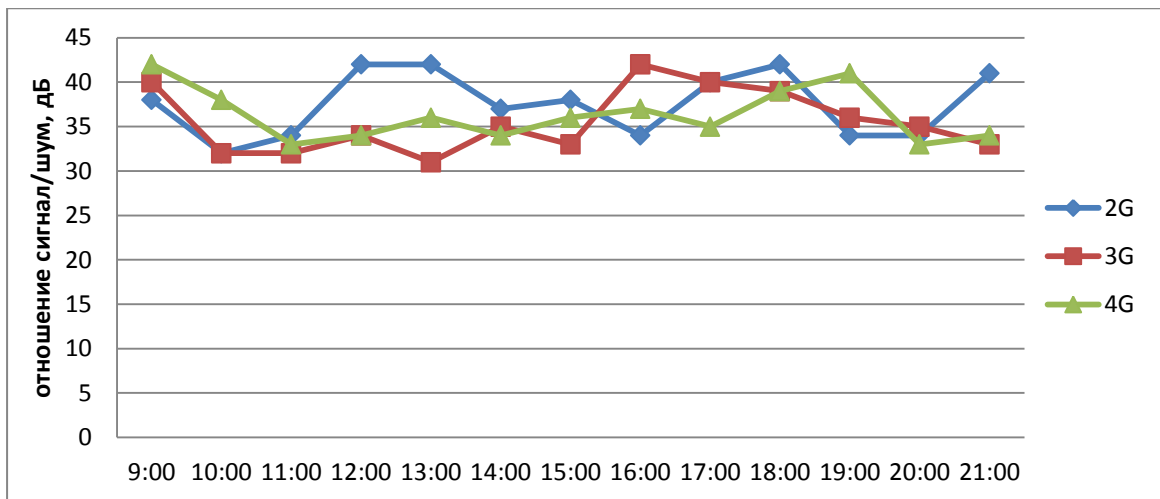


Рисунок 2.3 – Отношение сигнал/шум в малонаселенной местности

### 2.3 Данные исследования густонаселенной местности

Таблица 2.3 - Результаты измерений уровня принимаемой мощности и отношения сигнал/шум в густонаселенной местности в течении 12 часов

2G													
Время, ч.	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Уровень принимаемой мощности сигнала, дБм	-74	-74	-73	-100	-98	-98	-83	-83	-72	-105	-94	-99	-80
отношение сигнал/шум, дБ	30	30	27	22	22	21	29	27	29	30	19	22	20
3G													
Время, ч.	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Уровень принимаемой мощности сигнала, дБм	-81	-74	-75	-100	-104	-102	-72	-79	-79	-98	-97	-92	-102
отношение сигнал/шум, дБ	30	29	28	20	19	19	28	27	28	26	23	20	22
4G													
Время, ч.	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
Уровень принимаемой мощности сигнала, дБм	-79	-83	-75	-76	-78	-77	-83	-81	-80	-76	-81	-78	-82
отношение сигнал/шум, дБ	28	28	30	31	30	31	31	29	31	31	31	28	29

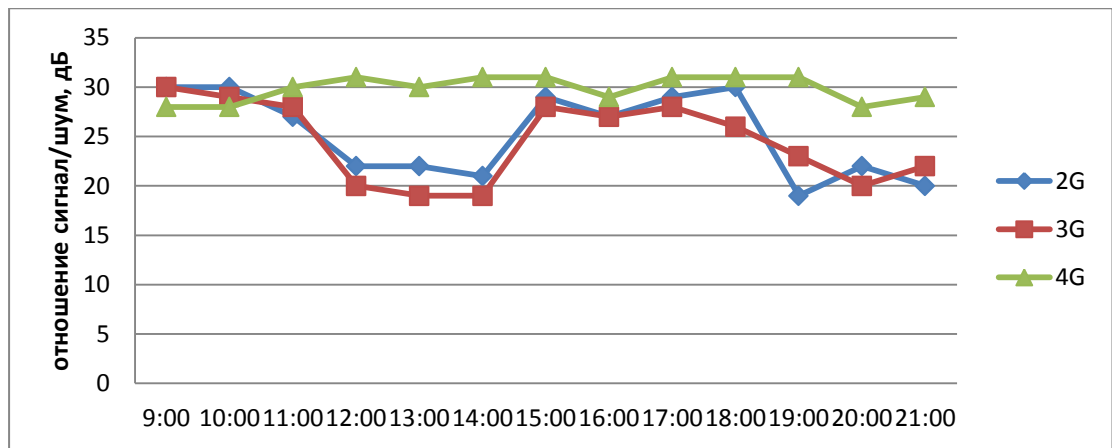


Рисунок 2.4 – Отношение сигнал/шум в густонаселенной местности

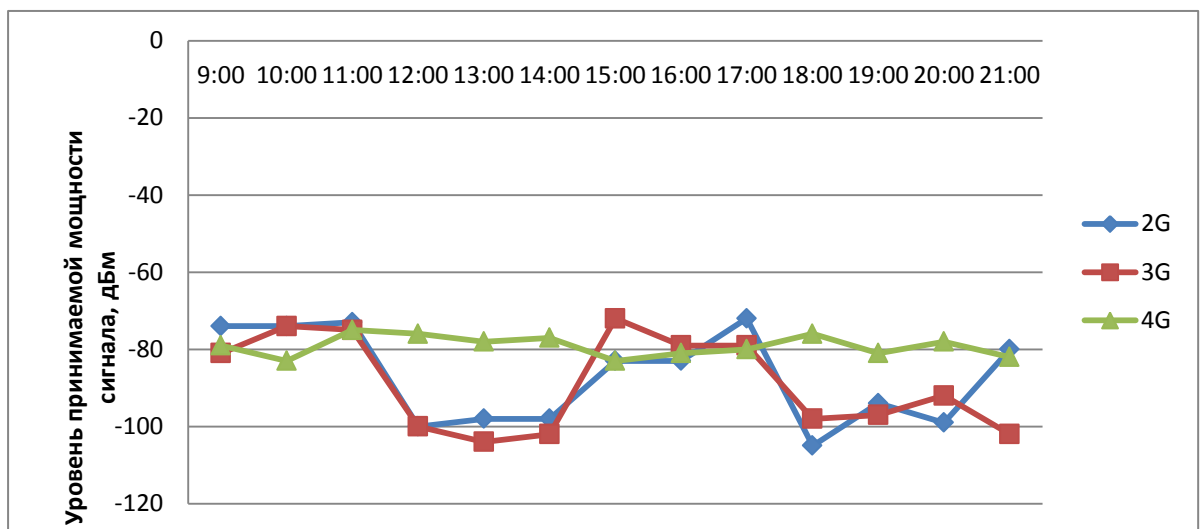


Рисунок 2.5 – Уровни принимаемой мощности сигнала в густонаселенной местности

По полученным данным можно сказать, что к технологиям последующего поколения накладываются дополнительные требования к минимальному времени задержки, к величине пиковой скорости передачи данных, к высокой надежности при малом энергопотреблении устройств.

При выполнении новых требований к стандартам сотовой связи предоставляются новые возможности и в конечном итоге получают социально-экономический эффект как минимум в следующих областях:

- Электронная медицина (eHealth);
- Подключенные дома (Connected homes);
- Безопасный транспорт;
- Интеллектуальные энергетические сети (Smart grids);
- Индустрия развлечений.

### 3. Расчетная часть

#### 3.1 Модель Оокура и Хата при условиях малонаселенной местности

Для расчетов использовалась модель Оокуры и Хаты, она в полной мере отображает характеристики UL и DL каналов. Так же отображает всю картину в общем беря во внимание все характеристики местности.

Расчет для малонаселенной местности (Медеуский район: пр. Райымбека, ул. Толе би, ул. Фурманова, ул. Есенберлина).

$$L_P = 46,3 + 33,9 \lg(f_0) - 13,83 \lg(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \lg(h_b)] \lg r + C, \quad (3.1)$$

Где  $C$  – постоянная: для средних городов и пригородных районов с умеренной растительностью  $C = 0$  и для центров крупных городов  $C = 3$ .

$h_b = 30$  м – высота антенны базовой станции

$h_m = 1,7$  м – высота антенны мобильной станции

#### 3.2 Второе поколение связи

##### 3.2.1 Потери при распространении от БС к МС

$$f_0 = 960 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot [\lg(11,75 \cdot 1,5)]^2 - 4,97 = -9,19 \cdot 10^{-4}, \quad (3.2)$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(960) - 13,82 \cdot \lg(35) + 9,19 \cdot 10^{-4} = 125,427$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(35) = 34,407$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r), \quad (3.3)$$

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}}, \quad (3.4)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{127,7 - 125,427}{34,407}} = 1,164 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{117,2 - 125,427}{34,407} = 0,577 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{129,7 - 125,427}{34,407} = 1,333 \text{ км}$$

### 3.2.2 Потери при распространении от МС к БС

$$f_0 = 915 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot [\lg(11,75 \cdot 1,5)]^2 - 4,97 = -9,19 \cdot 10^{-4},$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(915) - 13,82 \cdot \lg(35) + 9,19 \cdot 10^{-4} = 124,881$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(35) = 34,407$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r), \tag{3.5}$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{145,7 - 124,881}{34,407} = 4,028 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{135,2 - 124,881}{34,407} = 1,995 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{147,7 - 124,881}{34,407} = 4,605 \text{ км}$$

Т а б л и ц а 3.1 – Результаты расчётов модели Оокура и Хата в малонаселенной местности для второго поколения связи

Направление сектора БС относительно СП, град.	Потери при распространении, $L_P$ , дБ		Ожидаемое расстояние между БС и МС, км	Ожидаемое расстояние между МС и БС, км
	БС-МС	МС-БС		
Сектор А - 0°	127,7	145,7	1,164	4,028
Сектор В - 120°	117,2	135,2	0,577	1,995
Сектор С - 240°	129,7	147,7	1,333	4,605

### 3.3 Третье поколение связи

#### 3.3.1 Потери при распространении от БС к МС

$$f_0 = 1880 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = [1,1 \cdot \lg(f_0) - 0,7] \cdot h_m - [1,56 \cdot \lg(f_0) - 0,8], \quad (3.6)$$

$$a(h_m) = 1,1 \cdot [\lg(1880) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(1880) - 0,8] = 0,626$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(1900) - 13,83 \cdot \lg(30) - 0,626 = 136,39$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(30) = 35,22$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r), \quad (3.7)$$

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}}, \quad (3.8)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{131,16 - 125,427}{35,22}} = 0,987 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{123,41 - 136,39}{35,22}} = 0,594 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{146,7 - 136,39}{35,22}} = 1,962 \text{ км,}$$



### 3.3.2 Потери при распространении от МС к БС

$$f_0 = 1785 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = \left[ 1,1 \cdot \lg(f_0) - 0,7 \right] \cdot h_m - \left[ 1,56 \cdot \lg(f_0) - 0,8 \right], \quad (3.9)$$

$$a(h_m) = 1,1 \cdot [\lg(1785) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(1785) - 0,8] = 0,614$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(1785) - 13,83 \cdot \lg(30) - 0,614 = 135,192$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(30) = 35,22$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r), \quad (3.10)$$

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}}, \quad (3.11)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{154,2 - 135,192}{35,22}} = 3,465 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{154,2 - 124,881}{34,407}} = 4,742 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{154,2 - 124,881}{34,407}} = 10,715 \text{ км}$$

Т а б л и ц а 3.2 – Результаты расчётов модели Оокура и Хата в малонаселенной местности для третьего поколения связи

Направление сектора БС относительно СП, град.	Потери при распространении, L <sub>P</sub> , дБ		Ожидаемое расстояние между БС и МС, км	Ожидаемое расстояние между МС и БС, км
	БС-МС	МС-БС		
Сектор С	136,2	154,2	0,987	3,465
Сектор Ю-3	146,7		1,962	4,742
Сектор Ю-В	128,45		0,594	10,715

### 3.4 Четвертое поколение связи

#### 3.4.1 Потери при распространении от БС к МС

$$f_0=940 \text{ МГц}$$

$$a(h_m)=1,1 \cdot [\lg(940) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(940) - 0,8] = 0,018,$$

$$A=A(f_0, h_b, h_m)=69,55+26,16 \cdot \lg(940)-13,82 \cdot \lg(35) - 0,018=125,9$$

$$B=B(h_b)=44,9-6,55 \cdot \lg(35)=34,8$$

$$L_p=A+B \cdot \lg(r), \quad (3.12)$$

$$r = 10^{\frac{L_p - A}{B}}, \quad (3.13)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10^{\frac{L_p - A}{B}} = 10^{\frac{131,95 - 125,9}{34,8}} = 1,492 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10^{\frac{L_p - A}{B}} = 10^{\frac{120,2 - 125,9}{34,8}} = 0,686 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10^{\frac{L_p - A}{B}} = 10^{\frac{143,2 - 125,9}{34,8}} = 3,141 \text{ км}$$

#### 3.4.2 Потери при распространении от МС к БС:

$$f_0=900 \text{ МГц}$$

$$a(h_m)=1,1 \cdot [\lg(900) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(900) - 0,8] = 0,016,$$

$$A=A(f_0, h_b, h_m)=69,55+26,16 \cdot \lg(900)-13,82 \cdot \lg(35) - 0,016=125,47$$

$$B=B(h_b)=44,9-6,55 \cdot \lg(35)=34,8$$

$$L_p = A + B \cdot \lg(r) + C, \quad (3.14)$$

$$r = 10^{\frac{L_p - A - C}{B}}, \quad (3.15)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{156,7 - 125,47}{34,8} = 7,9 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{156,7 - 125,47}{34,8} = 7,9 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{156,7 - 125,47}{34,8} = 7,9 \text{ км}$$

Т а б л и ц а 3.3 – Результаты расчётов модели Оокура и Хата в малонаселенной местности для четвертого поколения связи

Направление сектора БС относительно СП, град.	Потери при распространении, L <sub>p</sub> , дБ		Ожидаемое расстояние между БС и МС, км	Ожидаемое расстояние между МС и БС, км
	БС-МС	МС-БС		
Сектор С	131,95	156,7	1,492	7,9
Сектор Ю-3	143,2		3,141	
Сектор Ю-В	120,2		0,686	

### 3.5 Модель Оокура и Хата при условиях густонаселённой местности

Расчет для густонаселенной местности (Бостандыкский район: пр. Абая, ул. Темирязева, ул. Байтурсынова, ул. Ауэзова).

$$L_p = 46,3 + 33,9 \lg(f_0) - 13,83 \lg(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \lg(h_b)] \lg r + C, \quad (3.16)$$

Где C – постоянная: для средних городов и пригородных районов с умеренной растительностью C = 0 и для центров крупных городов C = 3.

$h_b$  = 30 м – высота антенны базовой станции

$h_m$  = 1,7 м – высота антенны мобильной станции

### 3.6 Второе поколение связи

#### 3.6.1 Потери при распространении от БС к МС

$$f_0 = 960 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot [\lg(11,75 \cdot 1,5)]^2 - 4,97 = -9,19 \cdot 10^{-4}, \quad (3.17)$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(960) - 13,82 \cdot \lg(35) + 9,19 \cdot 10^{-4} = 125,427$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(35) = 34,407$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) + C, \quad (3.18)$$

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}}, \quad (3.19)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{130,7 - 125,427}{34,407}} = 1,42 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{120,2 - 125,427}{34,407}} = 0,7 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10^{\frac{L_P - A}{B}} = 10^{\frac{132,7 - 125,427}{34,407}} = 1,63 \text{ км}$$

#### 3.6.2 Потери при распространении от МС к БС

$$f_0 = 915 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = 3,2 \cdot [\lg(11,75 \cdot 1,5)]^2 - 4,97 = -9,19 \cdot 10^{-4}, \quad (3.20)$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(915) - 13,82 \cdot \lg(35) + 9,19 \cdot 10^{-4} = 124,881$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(35) = 34,407$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) + C, \quad (3.21)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{148,7 - 124,881}{34,407} = 4,923 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{138,2 - 124,881}{34,407} = 2,438 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{150,7 - 124,881}{34,407} = 5,629 \text{ км}$$

Т а б л и ц а 3.4 – Результаты расчётов модели Оокумура и Хата в густонаселенной местности для второго поколения связи

Направление сектора БС относительно СП, град.	Потери при распространении, L <sub>p</sub> , дБ		Ожидаемое расстояние между БС и МС, км	Ожидаемое расстояние между МС и БС, км
	БС-МС	МС-БС		
Сектор А - 0°	130,7	148,7	1,42	4,923
Сектор В - 120°	120,2	138,2	0,7	2,438
Сектор С - 240°	132,7	150,7	1,63	5,629

### 3.7 Третье поколение связи

#### 3.7.1 Потери при распространении от БС к МС

$$f_0 = 1880 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = [1,1 \cdot \lg(f_0) - 0,7] \cdot h_m - [1,56 \cdot \lg(f_0) - 0,8], \quad (3.22)$$

$$a(h_m) = 1,1 \cdot [\lg(1880) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(1880) - 0,8] = 0,626$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(1900) - 13,83 \cdot \lg(30) - 0,626 = 136,39$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(30) = 35,22$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) + C, \quad (3.23)$$

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B}, \quad (3.24)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{134,16 - 125,427}{35,22} = 1,77 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{126,41 - 136,39}{35,22} = 0,521 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{149,7 - 136,39}{35,22} = 2,238 \text{ км}$$

### 3.7.2 Потери при распространении от МС к БС

$$f_0 = 1785 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = [1,1 \cdot \lg(f_0) - 0,7] \cdot h_m - [1,56 \cdot \lg(f_0) - 0,8], \quad (3.25)$$

$$a(h_m) = 1,1 \cdot [\lg(1785) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(1785) - 0,8] = 0,614$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 46,3 + 33,9 \cdot \lg(1785) - 13,83 \cdot \lg(30) - 0,614 = 135,192$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(30) = 35,22$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) + C, \quad (3.26)$$

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B}, \quad (3.27)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{157,2 - 135,192}{35,22} = 4,216 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{157,2 - 135,881}{34,407} = 4,165 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{157,2 - 124,881}{34,407} = 8,696 \text{ км}$$

Т а б л и ц а 3.5 – Результаты расчётов модели Окомура и Хата в густонаселенной местности для третьего поколения связи

Направление сектора БС относительно СП, град.	Потери при распространении, L <sub>P</sub> , дБ		Ожидаемое расстояние между БС и МС, км	Ожидаемое расстояние между МС и БС, км
	БС-МС	МС-БС		
Сектор С	134,16	157,2	1,77	4,216
Сектор Ю-3	126,41		0,521	4,165
Сектор Ю-В	149,7		2,238	8,696

### 3.8 Четвертое поколение связи

#### 3.8.1 Потери при распространении от БС к МС

$$f_0 = 940 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = 1,1 \cdot [\lg(940) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(940) - 0,8] = 0,018$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(940) - 13,82 \cdot \lg(35) - 0,018 = 125,9$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(35) = 34,8$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) + C, \quad (3.28)$$

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B}, \quad (3.29)$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{134,95 - 125,9}{34,8} = 1,82 \text{ км}$$

Сектор В - 120°

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{123,2 - 125,9}{34,8} = 0,836 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{146,2 - 125,9}{34,8} = 3,831 \text{ км}$$

### 3.8.2 Потери при распространении от МС к БС

$$f_0 = 900 \text{ МГц}$$

$$a(h_m) = 1,1 \cdot [\lg(900) - 0,7] \cdot 1,5 - [1,56 \cdot \lg(900) - 0,8] = 0,016$$

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(900) - 13,82 \cdot \lg(35) - 0,016 = 125,47$$

$$B = B(h_b) = 44,9 - 6,55 \cdot \lg(35) = 34,8$$

$$L_P = A + B \cdot \lg(r) + C, \tag{3.30}$$

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B}, \tag{3.31}$$

Сектор А - 0°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{159,7 - 125,47}{34,8} = 9,6 \text{ км}$$

Сектор В - 120°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{159,7 - 125,47}{34,8} = 9,6 \text{ км}$$

Сектор С - 240°:

$$r = 10 \frac{L_P - A}{B} = 10 \frac{159,7 - 125,47}{34,8} = 9,6 \text{ км}$$



Т а б л и ц а 3.6 – Результаты расчётов модели Оокура и Хата в густонаселенной местности для четвертого поколения связи

Направление сектора БС относительно СП, град.	Потери при распространении, $L_p$ , дБ		Ожидаемое расстояние между БС и МС, км	Ожидаемое расстояние между МС и БС, км
	БС-МС	МС-БС		
Сектор С	134,95	159,7	1,82	9,6
Сектор Ю-3	147,2		3,831	
Сектор Ю-В	123,2		0,836	

#### 4. Оценка допустимой скорости передачи в канале для «близких» и «далеких» пользователей

Скорость передачи в канале для «близких» (в центре соты) пользователей (Мбит/с)

$$R1(u) = \frac{4}{7} W \log_2(1 + \eta1(u)); \quad (4.1)$$

для «далеких» (на границе соты) пользователей

$$R2(u) = \frac{3}{7} W \log_2(1 + \eta2(u)), \quad (4.2)$$

где  $W$  – полоса системы, МГц,  $\eta$  – SINR.

Т а б л и ц а 4.1 - Исходные данные

$W, \text{ МГц,}$	10
$\eta1(u)$	6
$\eta2(u)$	0,6

Скорость передачи для пользователей в центре соты

$$R1(u) = \frac{4}{7} 10 \log_2(1 + 6) = 16,04 \text{ Мбит/с,}$$

а скорость передачи для пользователей на границе соты

$$R2(u) = \frac{3}{7} 10 \log_2(1 + 0,6) = 2,91 \text{ Мбит/с.}$$

## Заключение

Из экспериментальных данных видно, что за период существования технологий сотовой связи произошел большой проыв в этой отрасли. С большим успехом развиваются пакетные передачи данных. Так же идет борьба с помехами на радио интерфейсе. Эксперимент показал, что все технологии сотовой связи имеющиеся на данный момент не идеальны, и что только их сочетание может дать идеальную среду передачи данных и голосового трафика.

Из-за особенностей технологий каждого поколения связи и их особенностях они не остаются пережитками прошлого, как например второе поколение связи, которое существует с 1991 года. В мало населенной местности лучшие характеристики имела технология второго поколения связи, за счет модуляций TDMA и FDMA, третье поколение связи хоть и имело больше скорость передачи, но проигрывало по уровню принимаемого сигнала и отношению сигнал шум, а четвертое было стабильно на всем промежутке эксперимента. В густонаселенном районе стандарты показали себя по-другому, у второго поколения связи ухудшалась связь, это объясняется тем что емкость модуляции не справлялось с количеством абонентов, из-за этого некоторые абоненты не могли воспользоваться услугами связи, в третьем поколении не много по-другому, при возрастании абонентов ухудшалось качество связи, потому что каждый абонент становился помехой для другого, из-за того что третье поколение связи использует кодовую модуляцию. Лучшее всего в густонаселенной местности показала себя технология четвертого поколения связи, при возрастании абонентов качество связи и показатели принимаемого сигнала оставались высокими, только снижалась скорость передачи данных.

В общем можно сказать что для развития технологии сотовой связи требуется увеличение чувствительности приемника сотового телефона, использовании новых методов модуляции и кодирования, повышение устойчивости сигнала к разным погодным условиям, независимость технологий от количества абонентов, большую защищенность от различных воздействий, сведение к минимуму влияния межсимвольной интерференции, а так же в увеличении пропускной способности и скорости передачи данных.

## Список литературы

1. Бабков Б. Ю., Вознюк М. А., В.И. Дмитриев. Системы мобильной связи / СПб ГУТ. – СПб, 1999. – 330 с.
2. Иванов В.И., Гордиенко В.Н. и др. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов/ Под ред. В.И. Иванова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 232 с.
3. Карташевский В.Г. и др. Сети подвижной связи. - М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 202 с.
4. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Под ред. Д.Е. Зимина. - М.: Радио и связь, 2000. – 250 с.
5. Коньшин С.В., Сабдыкеева Г.Г. Теоретические основы систем связи с подвижными объектами: Учебное пособие. – Алматы: АИЭС, 2002. – 23 с.
6. Коньшин С.В. Подвижные телекоммуникационные радиосистемы: Учебное пособие. - Алматы: АИЭС, 2003. – 22 с.
7. Lee W.C. Y. Mobile cellular telecommunications systems. - Howard W. Sam's & Co., 1989. – 332 с.
8. Masaharu Hata. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services// IEE Tr. VT-29. - №3. - 1980. - P. – 317 с.
9. Лившиц Б.С., Пшеничников А.П., Харкевич А.Д. Теория телетрафика М.: Связь, 1979. - 224 с.
10. ETSI Recommendation ETS 300 527, “Handover procedures (GSM 03.09)”, February 1995. – 152 с.
11. Л.П. Ключковская, С.В. Коньшин Расчет параметров систем подвижной связи: Учебное пособие. – Алматы: АИЭС, 2008 – 20 с.
12. В.Вишневский, С.Портной, И.Шахнович Энциклопедия WiMax. Путь 4G.: Техносфера, 2010 – 262 с.
13. По материалам <http://www.vixett.com/>
14. По материалам <http://www.intuit.ru/department/network/ndnets/>

## Приложение А

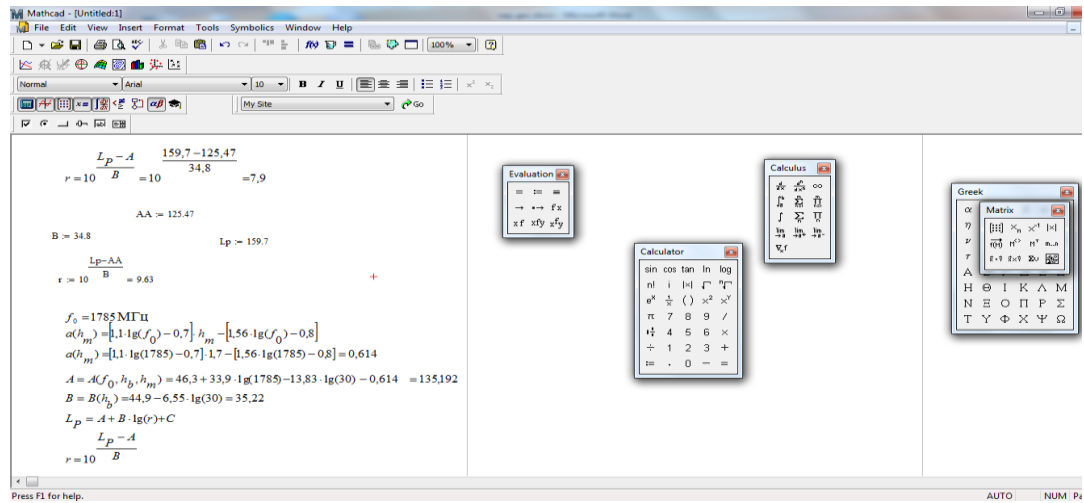
### Частотный диапазон стандарта LTE

RRU	Frequency band	RX band (MHz)	TX band (MHz)
RRU3908	900 MHz	890 to 915	935 to 960
		880 to 905	925 to 950
	850 MHz	824 to 849	869 to 894
	1800 MHz	1,710 to 1,755	1,805 to 1,850
		1,740 to 1,785	1,835 to 1,880
	1900 MHz	1,850 to 1,890	1,930 to 1,970
1,870 to 1,910		1,950 to 1,990	
RRU3804	Band I (2100 MHz)	1,920 to 1,980	2,110 to 2,170
	Band II (1900 MHz)	1,850 to 1,910	1,930 to 1,990
	Band IV (AWS)	1,710 to 1,755	2,110 to 2,155
	Band V/VI (850 MHz)	824 to 849	869 to 894

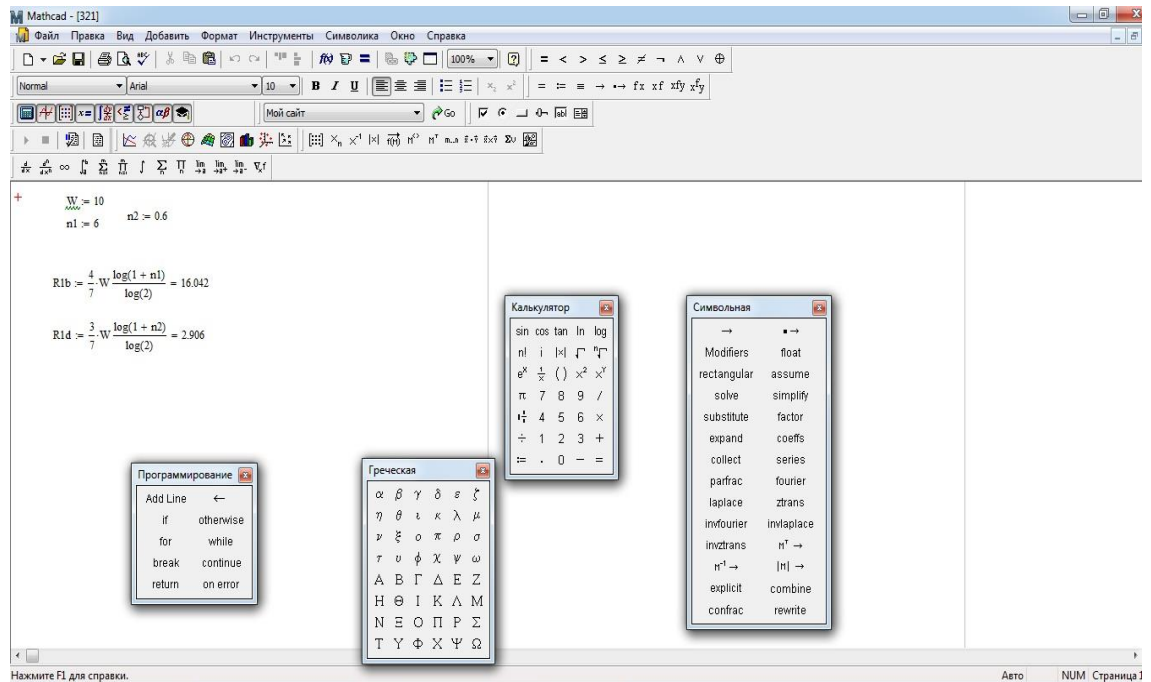
### A1 – Частотный диапазон стандарта LTE

## Приложение В

### Расчеты на программе MathCAD



### В1 – Расчет ослабления сигнала 2,3,4 поколения связи



### В2 – Оценка допустимой скорости передачи в канале сети для «близких» и «далеких» пользователей

## Приложение С

### Хронология изменений технологий сотовой связи

Поколение	1G	2G	2,5G	3G	3,5G	4G
Начало разработок	1970	1980	1985	1990	<2000	2000
Реализация	1984	1991	1999	2002	2006-2007	2008-2010
Сервисы	аналоговый стандарт, речевые сообщения	цифровой стандарт, поддержка коротких сообщений (SMS), передача данных со скоростью до 9,6 кбит/с	большая ёмкость, пакетная передача данных, увеличение скорости сетей второго поколения	ещё большая ёмкость, скорости до 2 Мбит/с	увеличение скорости сетей третьего поколения	большая ёмкость, IP-ориентированная сеть, поддержка мультимедиа, скорости до сотен мегабит в секунду
Скорость передачи	1,9 кбит/с	9,6-14,4 кбит/с	115 кбит/с (1 фаза), 384 кбит/с (2 фаза)	2 Мбит/с	3-14 Мбит/с	100 Мбит/с - 1 Гбит/с
Стандарты	AMPS, TACS, NMT	TDMA, CDMA, Global System for Mobile Communications (GSM), PDC	GPRS, EDGE (2.75G), 1xRTT	WCDMA, CDMA2000, UMTS	HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+	LTE-Advanced, WiMax Release 2 (IEEE 802.16m), WirelessMAN-Advanced
Сеть	PSTN	PSTN	PSTN, сеть пакетной передачи данных	сеть пакетной передачи данных	сеть пакетной передачи данных	сеть пакетной передачи данных

С1 - Хронология изменений технологий сотовой связи

## Приложение D

### Построения графика на программе Excel

