

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Кафедра «Телекоммуникационные системы»

Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

к.т.н., Шагиахметов Д.Р.

(ученая степень, звание, ФИО) (подпись)

« _____ » _____ 2014 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

пояснительная записка

на тему: «Анализ внедрения сети связи стандарта LTE в Республике
Казахстан»

Магистрант Курбантаев Лазизбек _____ группа ИТСП-12-1
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель к.т.н., доцент каф.ТКС _____ Жунусов К.Х.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Технический консультант _____
(подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент _____
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ к.х.н., ст.преп. _____ Данько Е.Т.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтроль ст.преп. _____ Абрамкина О. А.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы, 2014

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет «Радиотехники, электроники и связи»
Специальность 6М071900 «Радиотехники, электроники и телекоммуникации»
Кафедра «Телекоммуникационных систем»

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Курбантаев Лазизбек
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Анализ внедрения сети связи стандарта LTE в
Республике Казахстан»

утверждена Ученым советом университета №142 от « 31» октября 2013 г.

Срок сдачи законченной диссертации « ___ » _____

Цель исследования состоит в анализе сравнения методов взаимодействия
общеканальной сигнализации №7 и протокола установления
соединения.

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

1. Общеканальная система сигнализации №7
2. Протокол инициирования сеансов связи – SIP
3. Особенности взаимодействия SIP с протоколами управления СТОП
4. Экспериментальное исследование методов взаимодействия
5. Расчет сигнального трафика протокола SIP

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных
чертежей)

- Рисунок 1.2 - Взаимодействие цифровых сетей по ОКС-7
- Рисунок 1.7 - Структура сети ОКС-7
- Рисунок 2.4 - Структурная схема организации услуг SIP-сервера
- Рисунок 2.5- Структура сообщений протокола SIP

Рекомендуемая основная литература:

1 Гольдштейн Б.С., Сигнализации в сетях связи. М.: Радио и связь, 1997.

2 Гольдштейн Б.С., Протокол SIP. Справочник. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2005.

Г Р А Ф И К
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1 Информационный обзор методов взаимодействия ОКС-7 и SIP	05.10.2012	
2 Основные виды технологий абонентских линий	02.02.2013	
3 Анализ основных принципов методов взаимодействия	10.03.2013	
4 Анализ работы методов взаимодействия	05.09.2013	
5 Расчет сигнального трафика протокола SIP	18.10.2013	
6 Подготовка к проведению эксперимента	10.12.2013	

Дата выдачи задания _____

Заведующий кафедрой _____ (Шагиахметов Д.Р.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____ (Жунусов К.Х.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению
магистрант _____ (Курбантаев Л.К.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Аннотация

К защите представлена диссертация на тему «Исследование эффективности внедрения технологии LTE, в Казахстане на примере города Алматы». Диссертация посвящена исследованию распространения радиосигнала в условиях города Алматы применительно к технологии LTE (4G), а также эффективности внедрения технологии с целью повышения скорости передачи информации.

В процессе работы был произведен расчет и анализ уровня мощности радиосигнала при различных высотах подвеса принимающего устройства. Полученные графики могут иметь практическое значение для оперативной оценки зоны покрытия при расширении сети связи.

Сравнение результатов, полученных расчетным путем, с результатами моделирования уровня радиосигнала с помощью программы Atoll показали, что расчетные значения имеют отклонения от результатов моделирования в пределах 3 – 5%.

Расчет пропускной способности сети для передачи мультимедийных услуг позволил определить необходимое количество базовых станций.

Анализ тестов скорости в сетях LTE показал, что увеличение скорости по линии вниз составило 130-500 раз.

Содержание

Введение	7
1 Краткая характеристика и назначение сетей LTE	9
1.1 Организация телекоммуникационной сети LTE	10
1.2 Стеки протоколов, каналы и услуги на различных уровнях	16
1.3 Радиочастотный спектр и структура кадров технологии LTE	24
1.4 Технологии OFDM и SC-FDMA в сетях LTE	26
1.5 Использование технологии MIMO в сетях LTE	30
1.6 Частотное планирование сети LTE	33
2 Краткая характеристика оборудования сетей LTE	34
2.1 Управляющее оборудование сети LTE	34
2.2 Оборудование сети радиодоступа	36
2.4 Антенны	38
3 Исследование эффективности внедрения технологии LTE в г. Алматы	41
3.1 Анализ подхода к оценке распространения радиосигнала в сети LTE (на примере БС г. Алматы)	42
3.2 Исследование величины потерь, зависящих от высоты подвеса антенны принимающей станции	49
3.3 Исследование величины потерь при различных высотах подвеса антенны базовой станции и различных высотах антенны принимающего устройства	51
3.4 Исследование уровня мощности радиосигнала при различных высотах подвеса антенны базовой станции и различных высотах антенны принимающего устройства	54
3.5 Анализ сравнения результатов расчета дальности связи с результатами моделирования зоны покрытия	57
3.6 Расчет пропускной способности сети. Расчет количества потенциальных абонентов	58
3.7 Значения достигнутой скорости в сетях LTE	62
Заключение	64
Приложение А	65
Приложение Б	66
Приложение В	73
Приложение Г	79
Приложение Д	86
Приложение Е	87
Приложение Ж	88
Приложение И	89
Приложение К	95
Приложение Л	96
Список литературы	97

Введение

Актуальность проблемы.

В последние несколько лет объем передаваемой и принимаемой информации резко возрос, значительно увеличилось количество одновременно работающих сетей и абонентов в них, появилась потребность в дальнейшем увеличении скорости передачи информации. Создание сетей широкополосного доступа с использованием различных технологий позволяет решать эти задачи. Одной из последних и, ставшей одной из самых востребованных, стала технология LTE, базирующаяся на новых для телекоммуникационных систем принципах обработки и передачи информации.

В Республике Казахстан, активно внедряются новые технологии в телекоммуникационных системах, поэтому, уже в 2010 г. В г. Алматы была протестирована первая сеть LTE Beeline. Достигнутые при этом скорости до 60 Мб/сек по линии вниз и до 15 Мб/сек по линии вверх стали отличным аргументом в пользу развития сетей LTE в Алматы.

В настоящее время несколько операторов, среди которых ALTEL и Tele-2 запустили сети LTE в г. Алматы и других городах. Актуальным становится вопрос эффективности внедрения этих сетей.

Цели и задачи работы.

Одним из направлений работы стало исследование факторов, влияющих на распространение радиосигнала в условиях пересеченной местности, т.к. рельеф г. Алматы весьма разнообразен и может в некоторых районах относиться к гористой местности. Также были исследованы зависимости распространения радиосигнала при различных вариантах установки антенн принимающего устройства, т.к. LTE является технологией не столько голосового, сколько трафика передачи значительных объемов информации, в том числе и мультимедийного. Целью является разработка научно обоснованных технических решений по повышению ресурса сети.

Результаты расчетов сравнивались с результатами математического моделирования зоны покрытия радиосети.

Научная новизна.

В использованной в диссертации эмпирической модели расчета уровня мощности радиосигнала на различных расстояниях от базовой станции (БС) исследована зависимость уровня радиосигнала от высоты положения антенны принимающего устройства.

Предложены графики уровня мощности радиосигнала в зависимости от различных высот подвеса антенны БС и различных высот антенны принимающего устройства.

При расчете пропускной способности сети исследована зависимость пропускной способности радиосети при высоких нагрузках на сеть и мультимедийном трафике.

Объем и структура магистерской диссертации.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы: страниц 98; приложений 10; иллюстраций 44, таблиц 13, литературных источников, в том числе электронный ресурс 29.

Ключевые слова: высокие скорости передачи, структура сети, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением, технология ММО, потери при распространении, уровень мощности радиосигнала, пропускная способность сети.

1 Краткая характеристика и назначение сетей LTE

Long Term Evolution (LTE) – это новый стандарт высокоскоростной мобильной связи. LTE является следующим за 3G этапом развития технологии и обеспечивает значительно более высокие пиковые скорости. Скорость в сетях LTE заявлена: 326,4 Мбит в секунду на приём и 172,8 Мбит в секунду на отдачу данных. По мировым стандартам технологически доступная максимальная скорость сети LTE может достигать 100 Мбит/с – downlink (скорость получения) и 50 Мб/с – uplink (скорость передачи данных). Средняя скорость зависит от таких факторов, как близость к базовой станции и загрузка канала [1].

Радиус действия установленной базовой станции LTE может различаться в зависимости от используемых частот, мощности сигнала и радиоусловий в каждом отдельном случае. Как правило, этот показатель составляет около 5 километров, однако при достаточном поднятии антенны и мощности сигнала может достигать 30 и даже 100 километров.

В мобильных сетях 3-го и 4-го поколений передача услуг, в том числе, речевого общения, на основе канальной коммутации фактически отсутствует; реализация пакетной передачи речи базируется на технологиях VoIP (Voice over IP) или PoC (Push-to-talk over Cellular).

Наряду с пакетной передачей речи основными услугами являются следующие:

- передача интернет файлов (web-browsing);
- доставка электронной почты;
- мультимедийные сообщения (MMS, Multimedia Messaging Service), в том числе, мультимедийное вещание;
- потоковое видео (streaming);
- интерактивные игры в реальном времени.

Устройства нового поколения со встроенной поддержкой LTE и сценарий их применения показаны на рисунке 1.1.

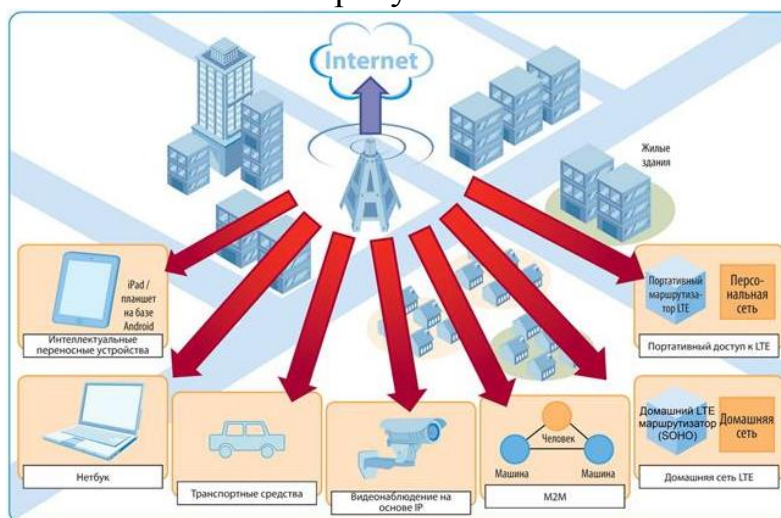


Рисунок 1.1 – Сценарии использования сети LTE

На территории Казахстана предложение по безлимитному пакету «Unlim LTE» сети ALTEL качественно отличается от любых других предложений. С такой скоростью у пользователя появляется возможность еще более широко и комфортно применять мобильный интернет в современной жизни: смотреть телевидение HD формата и YouTube, проводить видеоконференции и вебинары, скачивать, передавать и получать тяжелые файлы за считанные минуты, играть в он-лайн игры, использовать качественный интернет в зонах покрытия сети г. Астана и г. Алматы. Тест-драйв сети ALTEL 4G LTE в Астане и Алматы показал среднюю скорость скачивания до 50 Мбит/с [2].

Но первым в апреле 2010 года сеть LTE протестировал Beeline (входит в группу компаний «ВымпелКом»). По результатам тестирования сети в центральной части города Алматы сеть позволила организовать передачу данных на скорости до 60 Мб/сек в направлении к абоненту и до 15 Мб/сек – от абонента [1].

Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что технология LTE обеспечивает прием/передачу данных со скоростью, в десятки раз превышающей скорость предыдущих технологий.

1. 1 Организация телекоммуникационной сети LTE

В соответствии с Release 8 [3], который дал старт работам над техническим обликом сетей мобильной связи новых поколений, идущих за поколением 3G, разработчики отказались от технологии радиointерфейса W-CDMA и перешли на более прогрессивную технологию OFDMA. Новая система (см. рисунок 1.2) требовала значительное повышение спектральной эффективности, увеличение пропускной способности при ширине полосы одного частотного канала 20 МГц (с возможностью его масштабирования: 1,4; 3; 5; 10; 15 МГц), а также сокращения времени задержки передачи пакетов данных до 10 мс по сравнению с HSDPA и упрощение архитектуры сети [5].

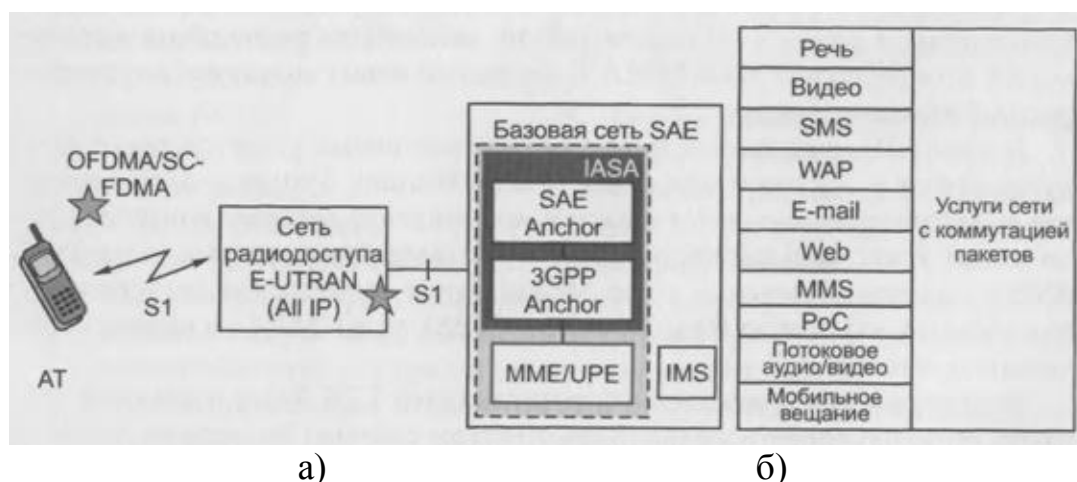


Рисунок 1.2 – Архитектура (а) и услуги (б) сети LTE согласно Release 8 [4,5,6] (S1 – интерфейс LTE)

В таблице 1 показаны основные параметры технологии LTE [3].

Т а б л и ц а 1 – Основные параметры технологии LTE

Технология множественного доступа	- прямой канал (Downlink – DL) – OFDMA; - обратный канал (Uplink – UL) – SC-FDMA;
Рабочий диапазон частот	450 МГц; 700 МГц; 800 МГц; 1800 МГц; 2,1 ГГц; 2,4 - 2,5 ГГц; 2,6 - 2,7 ГГц.
Битовая скорость	- прямой канал (DL) MIMO 2TX×2RX: 50 - 100 - 300 Мбит/с; - обратный канал (UL): 10 - 50 - 172,8 Мбит/с.
Ширина полосы радиоканала	1,4 - 20 МГц
Радиус ячейки	5 – 30 км
Емкость ячейки (количество обслуживаемых абонентов)	- более 200 пользователей при полосе 5 МГц; - более 400 пользователей при полосе больше 5 МГц
Мобильность	скорость перемещения до 250 км/ч
Параметры MIMO	- прямой канал (DL): 2TX×2RX, 4TX×4RX; - обратный канал (UL): 2TX×2RX
Значение задержки (latency)	5мс
Спектральная эффективность	5 бит/сек/Гц
Поддерживаемые типы модуляции	- прямой канал (DL): 64 QAM, QPSK, 16 QAM. - обратный канал (UL): QPSK, 16 QAM
Дуплексное разделение каналов	FDD, TDD

Relase 9 определил вторую фазу развития LTE:

- совершенствование функциональных возможностей (например, в реализации двухдиапазонной и многодиапазонной передачи данных в одном физическом канале)

- введение новых услуг в сетевые возможности (предупреждение о массовой опасности в случае, например, землетрясения, цунами и пр., дальнейшее развитие мультимедийных речевых услуг VoIP, широковещательных услуг, определение местоположения абонента);

- создание новых сценариев развития.

Relase 10 определил создание усовершенствованной технологии LTE Advanced [7].

В рамках технологии LTE Advanced для организации сетей LTE была предложена новая сетевая инфраструктура SAE (System Architecture Evolution) [8, 9, 10, 11]. В основу базовой сети SAE положена концепция «все через IP» и то обстоятельство, что доступ к ней может осуществляться как через сети радиодоступа второго и третьего поколений (UTRAN/GERAN), так и через сети не-3GPP (WiMAX, Wi-Fi), а так же через сети, использующие проводные IP-технологии (ADSL+, FTTH).

SAE описывает распределение необходимых функций к логическим узлам и требуемые интерфейсы между узлами. Как показано на рисунке 1.3, системная архитектура разделена на две части: сеть радиодоступа (Radio access network - RAN) и core network.



Рисунок 1.3 – Системная архитектура SAE

Далее (см. рисунок 1.4) представлена упрощенная схема реализации архитектуры SAE в рамках сети LTE.

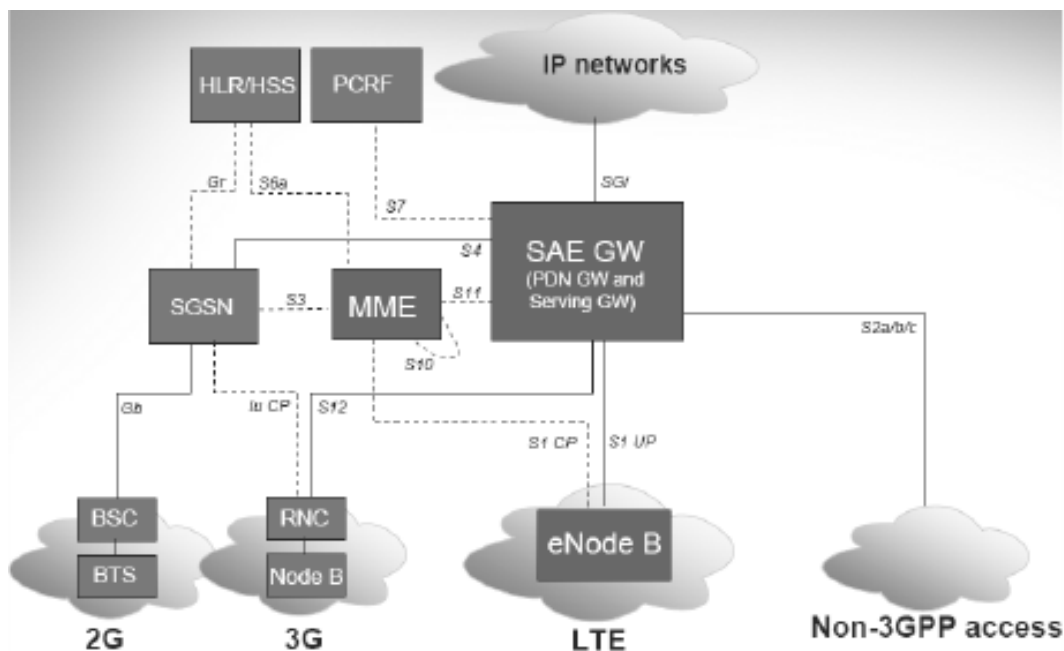


Рисунок 1.4 – Архитектура SAE в рамках сети LTE

Шлюз способен выполнять функции сети пакетных данных (PDN) и обслуживающего шлюза, при этом может быть настроен как на любую из этих ролей, так и на обе.

Функционально ММЕ отделен от шлюза – для облегчения развертывания сети, для перехода на независимую технологию и для максимально гибкой масштабируемости.

PDN-шлюз служит общей опорной точкой для всех технологий доступа, обеспечивая стабильную IP-точку присутствия для всех пользователей вне зависимости от мобильности.

ММЕ – модуль управления мобильностью (Mobility Management Entity,) обеспечивает хранение служебной информации об абоненте и управление ею. Это основной управляющий элемент в сети LTE. Он осуществляет только функции управления и не работает с пользовательскими данными. Имеет непосредственную связь с UE (областью пользовательского оборудования).

PCRF (Узел выставления счетов абонентам – Policy and Charging Rules Function): Policy Function (управление политикой) также может быть разделено на 2 функции: контроль шлюза (gating control) и контроль качеством.

Под контролем шлюза (gating control) понимается своевременность и безошибочность определения таких событий как начало предоставления, изменение параметров, завершение предоставления услуги и т.п.

Управление качеством включает в себя непрерывный мониторинг и поддержание заданных абонентскими параметрами характеристик качества предоставления услуг (QoS).

HLR/HSS (Home Subscriber Server — сервер абонентских данных сети) представляет собой большую базу данных и предназначен для хранения данных об абонентах.

HLR/HSS служит для хранения следующей информации:

- пользовательских идентификаторов, номеров и адресной информации
- данные безопасности абонентов: информация для контроля доступа в сеть, аутентификации и авторизации
- информация о местоположении абонента на межсетевом уровне, т.е. если даже абонент покинет текущую сеть LTE оператора, то в HSS сохранится информация о том в какую сеть он перешел для его поиска в случае входящего звонка
- информация о профиле абонента.

Генерирует данные, необходимые для осуществления процедур шифрования, аутентификации и т.п.

Итак, LTE основана на «плоской» сетевой архитектуре, при которой базовые станции (или - eNodeB в терминологии LTE) напрямую подключены к усовершенствованной пакетной опорной сети (EPC). Со стороны пользователя соединение устанавливается с обслуживающим шлюзом (SGW), с управляющей стороны – с системой поддержки мобильности (ММЕ).

В 3GPP Release (Релизе) 10 поддерживается функция ретрансляции, что

позволяет мобильным терминалам обмениваться данными с сетью через узел ретрансляции, соединенный по беспроводной связи с донорным узлом eNodeB, с использованием технологии радиодоступа LTE и спектра LTE, как показано на рисунке 1.5. С точки зрения терминала узел ретрансляции представляется «обычной» базовой станцией. Это означает, что устаревшие пользовательские устройства также могут подключаться к сети через узел ретрансляции. Функция ретрансляции может стать одним из способов быстрого и экономически эффективного расширения покрытия сети LTE. Сюда входят как расширение зоны обслуживания, так и увеличение скорости передачи данных [12].

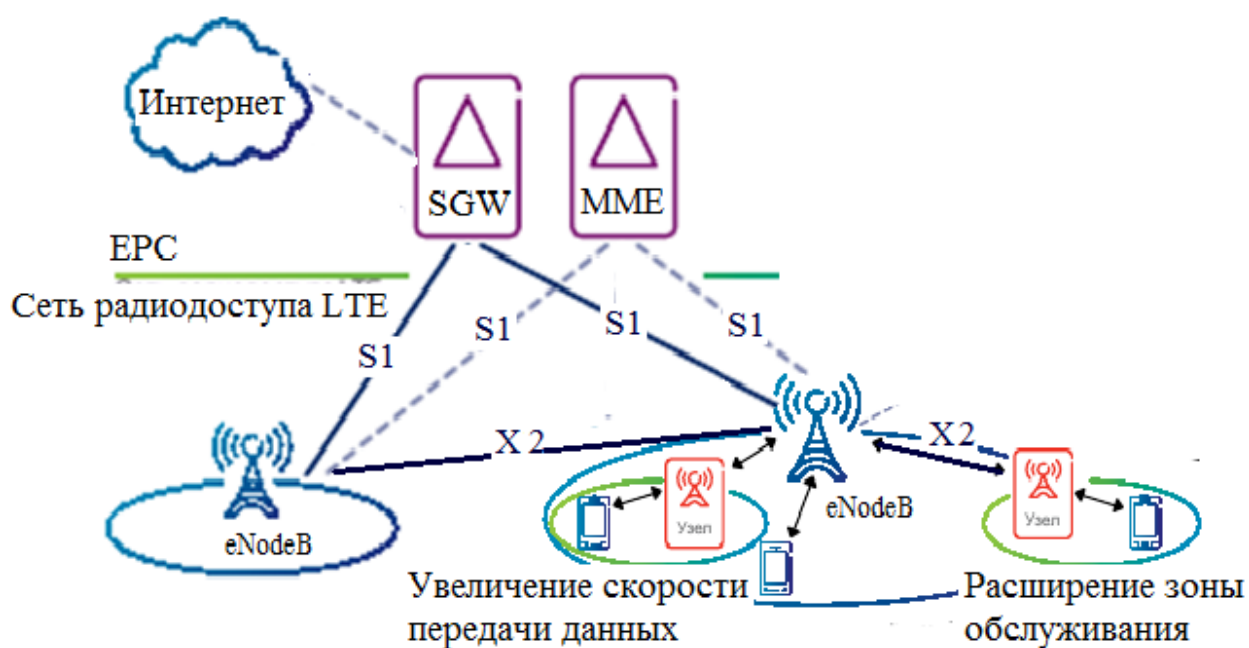


Рисунок 1.5 – Структура сети LTE в соответствии с Release 10

Область сети радиодоступа логически разделена на два уровня: уровень радиосети (RNL, Radio Network Layer) и уровень транспортной сети (TNL, Transport Network Layer). Взаимодействие входящих в область сети радиодоступа БС осуществляется на основе X2-интерфейса (см. рисунок 1.5). Кроме того, имеет место транзитное соединение между базовыми станциями и базовой сетью через блок управления мобильностью (БУМ: S1 – MM-интерфейс) или обслуживающий узел (ОУ). S1-интерфейс поддерживает множественные отношения между набором БС и блоками БУМ/ОУ.

На базовые станции (БС) в сетях LTE возложено выполнение следующих функций [13]:

1) Управление радиоресурсами: распределение радиоканалов, динамическое распределение ресурсов в восходящих и нисходящих направлениях — так называемое диспетчеризация ресурсов (scheduling) и др.

2) Сжатие заголовков IP-пакетов, шифрование потока пользовательских данных.

3) Выбор блока управления мобильностью при включении в сеть пользовательского терминала при отсутствии у того информации о прошлом подключении.

4) Маршрутизация в пользовательской плоскости пакетов данных по направлению к обслуживающему шлюзу.

5) Диспетчеризация и передача вызывной и вещательной информации, полученной от БУМ.

6) Диспетчеризация и передача сообщений PWS (Public Warning System, система тревожного оповещения), полученных от БУМ.

7) Измерение и составление соответствующих отчётов для управления мобильностью и диспетчеризации.

Блок управления мобильностью обеспечивает выполнение следующих функций:

1) Передача защищённой информации о точках доступа к услугам и защищённое управление точками доступа.

2) Передача информации в базовую сеть для управления мобильностью между различными сетями радиодоступа.

3) Управление БС, находящимися в состоянии ожидания, включая перенаправление вызовов.

4) Управление списком зон отслеживания ПТ.

5) Выбор обслуживающего шлюза и шлюза пакетной сети для се-

6) тей радиодоступа различных стандартов.

7) Выбор нового блока управления мобильностью при выполне-

8) нии хэндовера.

9) Роуминг.

10) Аутентификация.

11) Управление радиоканалом, включая установку выделенного ка-

12) нала.

13) Поддержка передачи сообщений PWS.

Обслуживающий узел отвечает за выполнение следующих функций:

1) Выбор точки привязки (“якоря”) локального местоположения

2) (Local Mobility Anchor) при хэндовере.

3) Буферизация пакетов данных в нисходящем направлении, предназначенных для ПТ, находящихся в режиме ожидания, и инициализация процедуры запроса услуги.

4) Санкционированный перехват пользовательской информации.

5) Маршрутизация и перенаправление пакетов данных.

6) Маркировка пакетов транспортного уровня.

7) Формирование учётных записей пользователей и идентификатора класса качества обслуживания для тарификации.

8) Тарификация абонентов.

Шлюз пакетной сети обеспечивает выполнение следующих функций:

- 1) Фильтрация пользовательских пакетов.
- 2) Санкционированный перехват пользовательской информации.
- 3) Распределение IP-адресов для ПТ.
- 4) Маркировка пакетов транспортного уровня в нисходящем направлении.
- 5) Тарификация услуг, их селекция.

1.2 Стеки протоколов, каналы и услуги на различных уровнях

На рисунке 1.6 показан относящийся к различным плоскостям стек протоколов, разделённый на следующие уровни (подуровни) [13]:

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

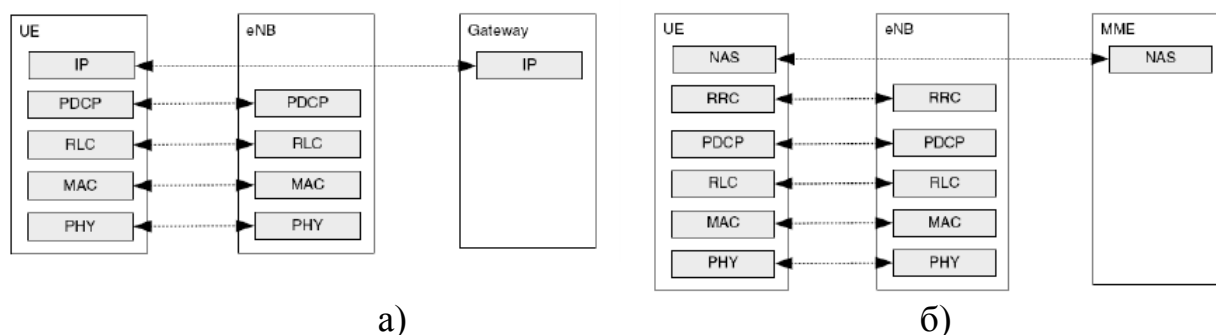


Рисунок 1.6 – Стек протоколов в пользовательской плоскости (а) и в плоскости управления (б)

На нижнем, физическом уровне, называемом также Уровнем 1 (L1, Layer 1) реализованы услуги по передаче данных на более высокие уровни.

Точки доступа к услугам между физическим уровнем и MAC-подуровнем обеспечиваются транспортными каналами, а между MAC-подуровнем и RLC-подуровнем — логическими каналами. На рисунке 1.7 показана структура канального уровня, называемого также Уровнем 2 (L2, Layer 2) в нисходящем и восходящем направлениях; различие структур в том, что в нисходящем направлении на MAC-подуровне происходит управление приоритетом нескольких ПТ, в то время как в восходящем

направлении такое управление относится только к одному ПТ.

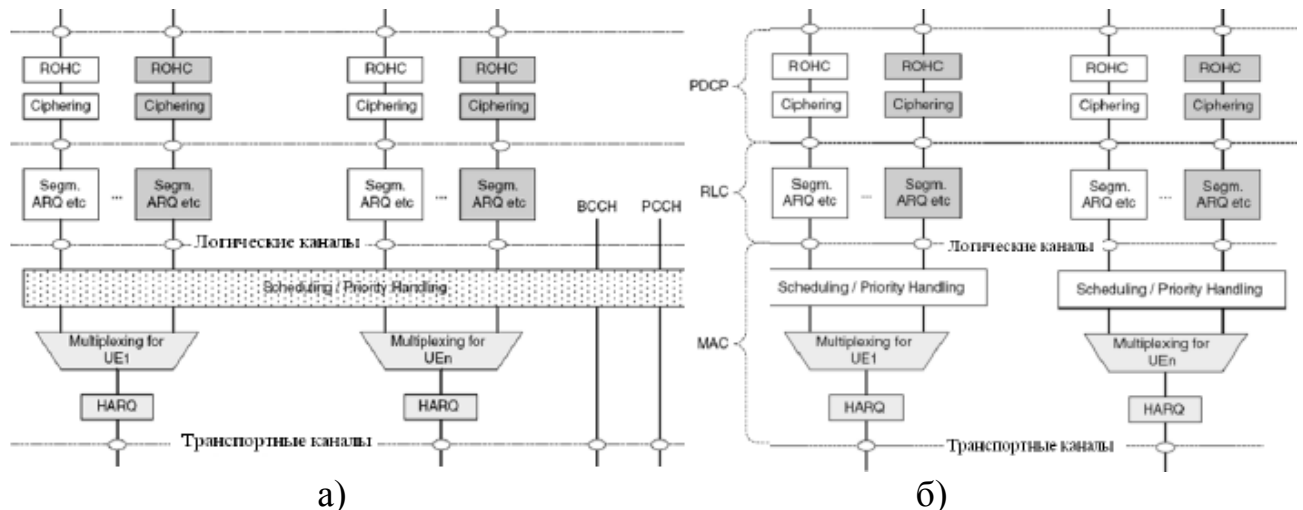


Рисунок 1.7 – Структура канального уровня в нисходящем (а) и восходящем (б) направлениях

На MAC-подуровне обеспечивается выполнение следующих основных функций:

- 1) Мультиплексирование пакетов услуг (SDU, Service Data Unit), относящихся к одному или нескольким логическим каналам, в транспортные блоки транспортных каналов и выполнение обратных функций.
- 2) Диспетчеризация составления отчётов.
- 3) Исправление ошибок через запросы на повторную передачу.
- 4) Управление приоритетом между логическими каналами.
- 5) Идентификация услуг мультимедийного вещания (MBMS, Multimedia Broadcast Multicast Service).
- 6) Выбор транспортного формата.
- 7) Выравнивание содержимого пакетов данных.
- 8) Передача данных на RLC-подуровне может происходить в двух режимах: с подтверждением (AM, Acknowledge Mode) либо без подтверждения (UM, Unacknowledge Mode). Режим без подтверждения, при его возможном использовании в радиоканале, допускает некоторую потерю пакетов данных. В режиме с подтверждением используется механизм автоматических запросов на повторную передачу потерянных пакетов.

На RLC-подуровень возложены следующие функции:

- 1) Передача пакетов данных на более высокий уровень.
- 2) Исправление ошибок через запросы на повторную передачу (только в режиме с подтверждением).
- 3) Конкатенация (сцепление), сегментация и повторная сборка пакетов услуг.
- 4) Повторная сегментация пакетов данных (только в режиме с подтверждением).
- 5) Изменение порядка следования пакетов данных.

6) Функционирование протокола обнаружения ошибок (только в режиме с подтверждением).

7) Отбрасывание искаженных пакетов услуг.

8) Повторная установка соединения на уровне RLC.

Функции PDCP-подуровня:

1) Сжатие / восстановление заголовков по протоколу RHC (Robust Header Compression).

Передача пользовательских данных.

2) Последовательная доставка пакетов данных более высокого уровня (в режиме с подтверждением).

3) Двойное обнаружение пакетов услуг с более низкого уровня (в режиме с подтверждением).

4) Повторная передача пакетов услуг при хэндовере (в режиме с подтверждением).

5) Шифрование / дешифрование.

6) Отбрасывание искаженных пакетов услуг в восходящем на-

7) правлении.

8) Передача управляющей информации.

Основные услуги и функции RRC-подуровня включают следующее:

1) Вещание системной информации, относящейся как к слою доступа, так и к его внешности.

2) Осуществление вызовов.

3) Установка, регулирование и снятие соединения на RRC-подуровне между ПТ и сетью.

4) Функции защиты информации, включая управление ключами шифрования.

5) Установка, конфигурирование, регулировка и снятие сквозного радиоканала.

6) Функции управления мобильностью.

7) Подтверждение услуг мультимедийного вещания.

8) Управление качеством обслуживания.

9) Составление отчетов об измерении параметров, относящихся к ПТ.

10) Прямой обмен сообщениями между ПТ и сетевой областью вне слоя доступа.

На рисунке 1.8 представлены стеки похожих протоколов S1(a, б) и X2 (в, г) соответственно. Интерфейс S1-U протокола S1 в пользовательской плоскости, определенный между БС и ОУ, использует протокол GTP-U (GPRS Tunneling Protocol) туннелирования пакетов, обеспечивая негарантированную доставку пользовательских данных. Будучи достаточно простым, этот IP-протокол позволяет установить несколько туннелей между каждым набором конечных узлов.

В плоскости управления между БС и БУМ определён интерфейс S1-MM, использующий на транспортном уровне TCP-подобный протокол SCTP передачи потока служебной информации.

На уровне приложений используются протоколы S1-AP и X2-AP.

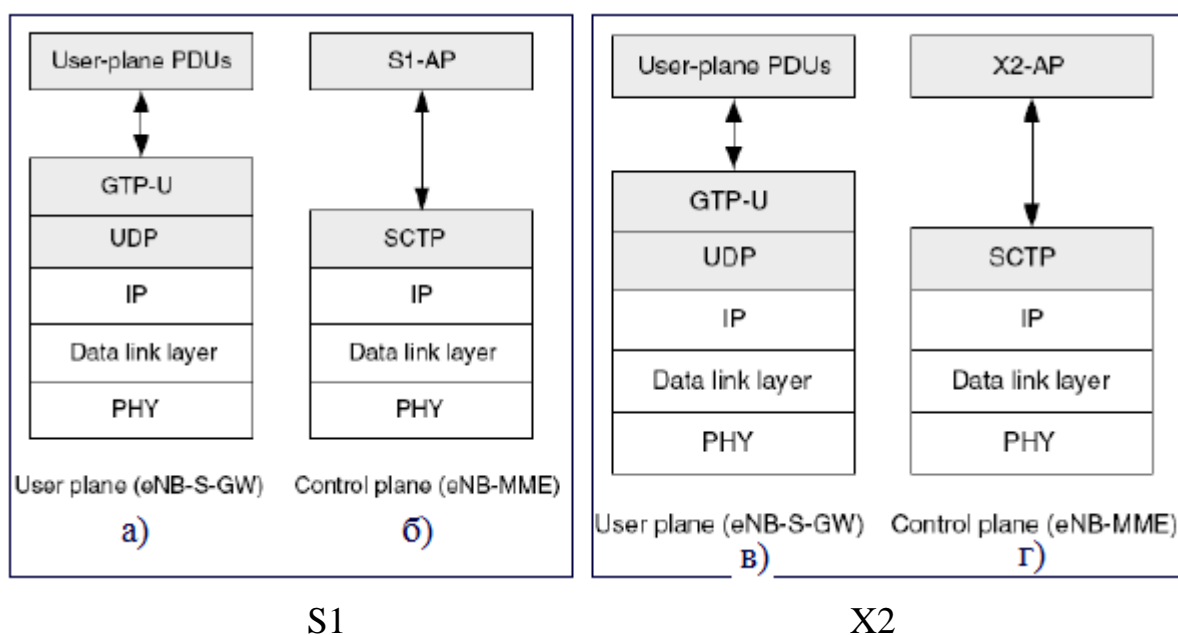


Рисунок 1.8 – Стеки протоколов S1 и X2 в пользовательской плоскости (а, в) и плоскости управления (б, г)

Большинство пользовательских приложений описываются набором показателей качества обслуживания QoS.

В сетях LTE (как и в сетях UMTS) вводится понятие сквозного канала (end-to-end bearer – см. рисунок 1.9) между двумя оконечными точками: либо между двумя пользователями, либо, например, между пользовательским терминалом и каким-либо интернет-сервером. Части сквозного канала – на разных уровнях и в различных сетевых узлах – это радиоканал (radio bearer), внешний канал (external bearer) и др. Канал, переносящий ряд параметров качества обслуживания, устанавливаемый между ПТ и шлюзом пакетной сети в LTE-спецификациях называется EPS-канал (EPS bearer, EPS – Evolved Packet System, выделенная пакетная система). Каждый IP-поток, например, голосовой трафик, передаваемый посредством IP-протокола (VoIP), связан с индивидуальным EPS-каналом, и, в соответствии с этим, сеть способна устанавливать различным абонентам разные приоритеты. Когда IP-пакет приходит извне (внешняя IP-сеть, интернет), он классифицируется обслуживающим узлом по качеству обслуживания на основе предустановленных параметров, отображается в соответствующий EPS-канал и далее передаётся по радиоканалу между БС и ПТ. Таким образом, существует взаимно-однозначное соответствие между EPS-каналом и радиоканалом.

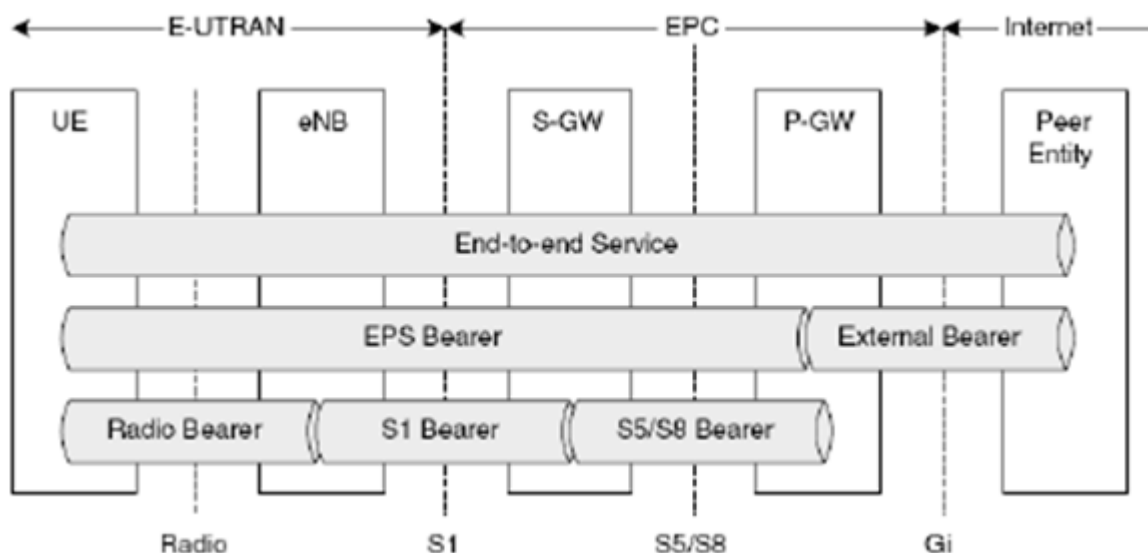


Рисунок 1.9 – Архитектура сквозного канала

В нисходящем направлении определены пять управляющих логических каналов (см. рисунок 1.10):

- 1) вызывной управляющий канал PCCH (Paging Control Channel), предназначенный для поиска абонента (терминала) в сети посредством передачи вызывной информации;
- 2) вещательный управляющий канал BCCH (Broadcast Control Channel), используемый для передачи в сети служебной информации;
- 3) общий управляющий канал CCCH (Common Control Channel), при использовании которого обеспечивается связь между сетью и ПТ, не имеющим соединения на RRC-подуровне (RRC-соединения);
- 4) выделенный управляющий канал DCCH (Dedicated Control Channel), также предназначенный для обеспечения связи между сетью и ПТ, но имеющим RRC-соединение;
- 5) групповой управляющий канал MCCH (Multicast Control Channel), при помощи которого обеспечивается совместная (для нескольких пользователей) передача мультимедийных услуг.

Наряду с управляющими, определены два трафиковых логических канала:

- 1) выделенный трафиковый канал DTCH (Dedicated Traffic Chanel), устанавливаемый между двумя абонентами для передачи пользовательской информации;
- 2) групповой трафиковый канал MTCH (Multicast Traffic Chanel), устанавливаемый для передачи услуг мультимедийного вещания.

Передача пользовательской или служебной информации с более высокого на более низкий уровень описывается в терминах отображения каналов: логических – на транспортные, транспортных – на физические.

Логический канал PCCH в нисходящем направлении отображается на транспортный вызывной канал PCH (Paging Channel), поддерживающий прерывистый (для экономии энергии) приём пакетов данных.

Логический канал BCCH отображается либо на транспортный вещательный канал BCH (Broadcast Channel), либо транспортный нисходящий совместный канал DL-SCH (Downlink Shared Channel).

Канал BCH характеризуется фиксированной конфигурацией транспортного блока, и именно на него настраивается ПТ после синхронизации в соте.

В канале DL-SCH поддерживаются адаптивные методы модуляции и кодирования, управление мощностью, гибридные автоматические запросы на повторение, многоантенные технологии и др.

Логические каналы MCCH и MTCH отображаются либо в транспортный групповой канал MCH (Multicast Channel), либо в транспортный нисходящий совместный канал DL-SCH. Канал MCH поддерживает групповую передачу мультимедийных услуг от нескольких сот.

Логические каналы CCCH, DCCH и DTCH отображаются в транспортный канал DL-SCH.

Итак, семь логических каналов отображаются на четыре транспортных канала. Далее, при переходе на физический уровень, происходит отображение транспортных каналов на шесть физических каналов.

Транспортный канал BCH отображается в физический вещательный канал PBCH (Physical Broadcast Channel), который передаётся во временном интервале длительностью 40 мс, называемый кадром.

Транспортные каналы PCH и DL-SCH отображаются в физический нисходящий совместный канал PDSCH (Physical Downlink Shared Channel).

Транспортный канал MCH отображается в физический канал группового вещания PMCH (Physical Multicast Channel).

Оставшиеся три физических канала: физический управляющий канал индикатора формата PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel), физический нисходящий управляющий канал PDCCH (Physical Downlink Control Channel) и физический канал индикатора гибридного запроса на повторение PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel) являются автономными, т. е. на них транспортные каналы не отображаются. Каналы PDCCH и PCFICH используется для информирования ПТ о выделении ресурсов для транспортных каналов PCH и DL-SCH, а также параметров модуляции и кодирования. Канал PHICH, как следует из его названия, используется для передачи запросов на повторную передачу.

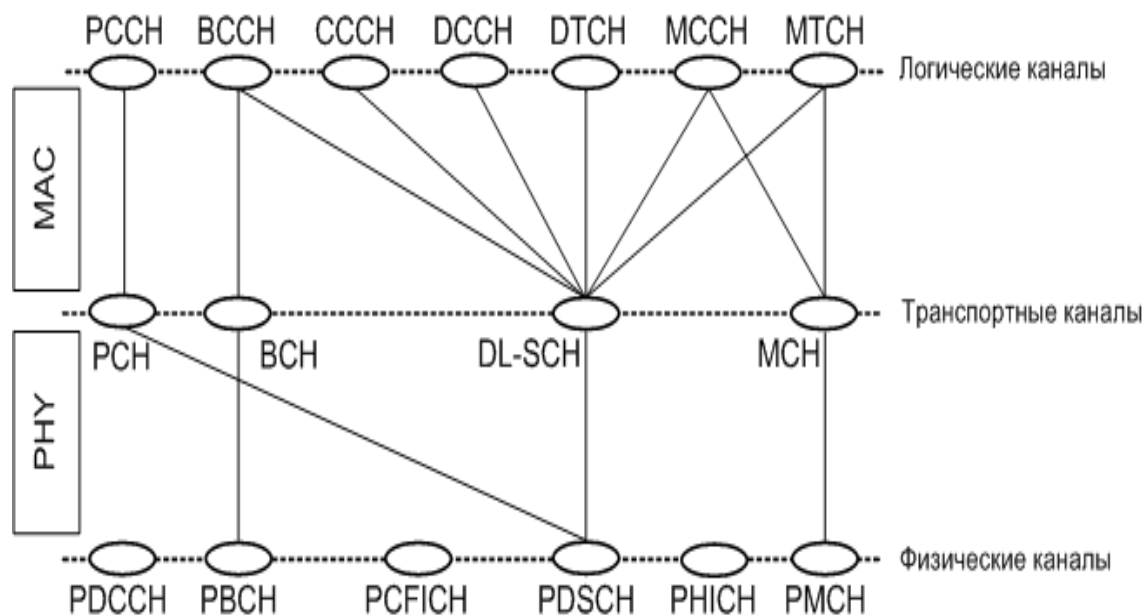


Рисунок 1.10 – Отображение физических, транспортных и логических каналов в нисходящем направлении

Взаимное отображение логических, транспортных и физических каналов в восходящем направлении (см. рисунок 1.11) имеют три логических канала, из которых два управляющих и один трафиковый, два транспортных канала и три физических.

Логические общий CCCH и выделенный DCCH управляющие каналы используются для передачи служебной информации между сетью и ПТ, соответственно, не имеющим либо имеющим RRC-соединение.

Логический выделенный трафиковый канал DTCH, предназначен для передачи пользовательской информации одному ПТ.

Все три логических канала отображаются в один транспортный восходящий совместный канал UL-SCH (Uplink Shared Channel), поддерживающий адаптивные методы модуляции и кодирования, управление мощностью, гибридные автоматические запросы на повторение, полустатическое/динамическое распределение ресурсов. Другой транспортный канал восходящего направления – канал случайного доступа RACH (Random Access Channel) используется для передачи определённой информации (запроса на предоставление выделенного канала) от ПТ с возможностью возникновения коллизий, когда подобный запрос поступает от других ПТ.

Транспортный канал RACH отображается на физический канал случайного доступа PRACH (Physical Random Access Channel), который переносит соответствующую преамбулу случайного доступа.

Транспортный канал UL-SCH отображается на физический восходящий совместный канал PU-SCH (Physical Uplink Shared Channel).

Оставшийся физический восходящий управляющий канал PU-CCH (Physical Uplink Control Channel) является автономным – на него не отображаются транспортные каналы. Он используется для передачи отчётов об индикации качества нисходящего канала, запросов на порядок следования пакетов данных и др.

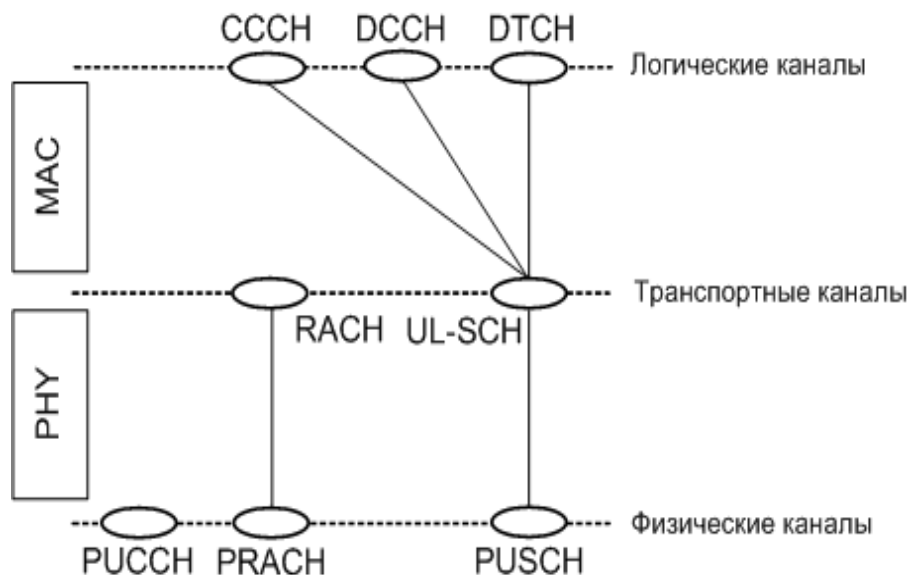


Рисунок 1.11 – Отображение физических, транспортных и логических каналов в восходящем направлении

В сетях LTE для каждого ПТ определены два состояния по отношению к RRC-подуровню: соединение (RRC CONNECTED) и ожидание (RRC IDLE).

Важнейшей особенностью сетей LTE, является поддержка “бесшовной” мобильности абонента по отношению к смене различных базовых станций, обслуживающих узлов и сетей (т. е. сетевых шлюзов). Требования к эффективности мобильности ещё более повышаются при использовании таких чувствительных к задержкам отдельных пакетов приложений, как VoIP. В основе бесшовной мобильности лежат различные процедуры хэндовера – эстафетная передача активного (т. е. находящегося в режиме сеанса связи или соединения) абонента при пересечении им различных географических зон. Смена сот (БС) происходит значительно чаще, чем смена обслуживающего шлюза и, тем более, самой базовой сети. Поэтому для подготовки к выполнению хэндовера используется сигнализация по интерфейсу X2, действующему между различными БС.

В сетях LTE анализ окружающей обстановки и выбор соты-кандидата на хэндовер доверены самому ПТ, хотя, конечно, окончательное решение о хэндовере принимается сетью.

1.3 Радиочастотный спектр и структура кадров технологии LTE

Рабочими группами Партнерского проекта 3GPP и ETSI в технических спецификациях для LTE определены 17 полос радиочастот для режима частотного дуплекса FDD и 8 полос для режима временного дуплекса TDD, которые показаны в таблице 2.

Т а б л и ц а 2 – Диапазоны частот для сети радиодоступа E-UTRA

Номера рабочих диапазонов	Диапазон частот, МГц		Вид дуплекса
	Линия «вверх» (UL)	Линия «вниз» (DL)	
1	1920 - 1980	2110 - 2170	FDD
2	1850 – 1910	1930 – 1990	FDD
3	1710 – 1785	1805 – 1880	FDD
4	1710 – 1755	2110 – 2155	FDD
5	824 – 849	869 – 894	FDD
6	830 – 840	875 – 885	FDD
7	2500 – 2570	2620 – 2690	FDD
8	880 – 915	925 – 960	FDD
9	1749,9 – 1784,9	1844,9 – 1879,9	FDD
10	1710 – 1770	2110 – 2170	FDD
11	1427,9 – 1452,9	1475 – 1500,9	FDD
12	698 – 716	728 – 746	FDD
13	777 – 787	746 – 756	FDD
14	788 – 798	758 – 768	FDD
17	704 – 716	734 – 746	FDD
18	815 – 830	860 – 875	FDD
19	830 – 845	875 – 890	FDD
33	1900 – 1920		TDD
34	2010 – 2025		TDD
35	1850 – 1910		TDD
36	1930 – 1990		TDD
37	1910 – 1930		TDD
38	2570 – 2620		TDD
39	1880 – 1920		TDD
40	2300 – 2400		TDD

Сигналы нисходящего или восходящего направления могут занимать полосы от 1,4 до 20 МГц в зависимости от количества активных ресурсных блоков. Границы частотного диапазона, занимаемого сигналом, всегда определяются симметрично относительно несущей частоты f_c :

$$f_{min} = f_c + BW_{ch}/2, \quad (1.1)$$

$$f_{min} = f_c - BW_{ch}/2. \quad (1.2)$$

Для любого частотного диапазона вводится частотная сетка с шагом 100 кГц, называемым канальным растром; это означает, что центральные (несущие) частоты каналов должны быть кратны 100 кГц.

Все временные значения выражаются в единицах элементарного временного интервала, равного

$$T_s = 1/(1500 \cdot 2048) \text{ с}. \quad (1.3)$$

Передача информации в восходящем и нисходящем направлениях организована в кадрах (radio frames) длительностью

$$T_f = 30720 \cdot T_s = 10 \text{ мс}, \quad (1.4)$$

которые, в свою очередь, подразделяются на более мелкие временные структуры - слоты. При этом возможны два типа структур кадра: Тип 1, применяемый в режиме FDD с частотным дуплексом и Тип 2, применяемый в режиме TDD с временным дуплексом [13].

Структура кадра Типа 1 (см. рисунок 1.12), применяемого как в (полно)дуплексном, так и полудуплексном FDD-режимах, предполагает деление кадра на 20 слотов, нумеруемых от нулевого до 19-го, каждый из которых имеет длительность

$$T_{slot} = 15360 \cdot T_s = 0,5 \text{ мс} \quad (1.5)$$

В пределах кадра различают подкадры, представляющие собой пару из двух смежных слотов, *i*-й подкадр содержит слоты с номерами $2i$ и $2i + 1$.

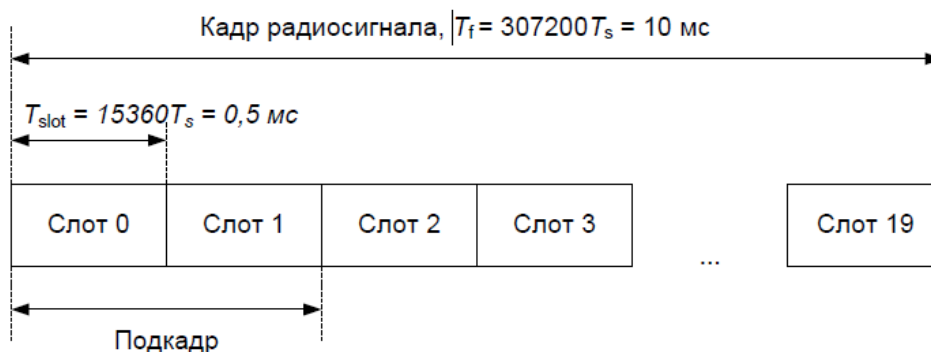


Рисунок 1.12– Структура кадра Типа 1

В режимах с частотным разнесением временной ресурс в пределах кадра разделён пополам для передачи в противоположных направлениях: 10 подкадров доступны для передачи в восходящем направлении и 10 - в нисходящем. При этом, как следует из физической сущности организации FDD-режимов, физические каналы в противоположных направлениях разделены в спектральной области дуплексным расстоянием. В полудуплексном режиме физические каналы по-прежнему разделены дуплексным расстоянием, однако ПТ не может одновременно работать на приём и на передачу.

Кадры типа 2 используются при временном разнесении каналов. При этом каждый кадр (см. рисунок 1.13) разделён на два полукадра (не путать с подкадром), каждый из которых имеет длительность (hf - half-frame)

$$T_{hf} = 153600 \cdot T_s = 5 \text{ мс}, \quad (1.6)$$

а каждый полукадр состоит из пяти последовательных подкадров длительностью (sf – sub-frame)

$$T_{sf} = 30720 \cdot T_s = 1 \text{ мс}. \quad (1.7)$$

Необходимость перехода от одного направления к другому означает наличие в кадрах специальных подкадров, содержащих пилотное поле, называемое точкой переключения, обозначаемое в таблице 3 символом «S». В этом поле выделяют специальные пилотные слоты нисходящего направления DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) и пилотные слоты восходящего направления UpPTS (Uplink Pilot Time slot), которые располагаются последовательно, вместе с защитным полем GP (Guard Period).

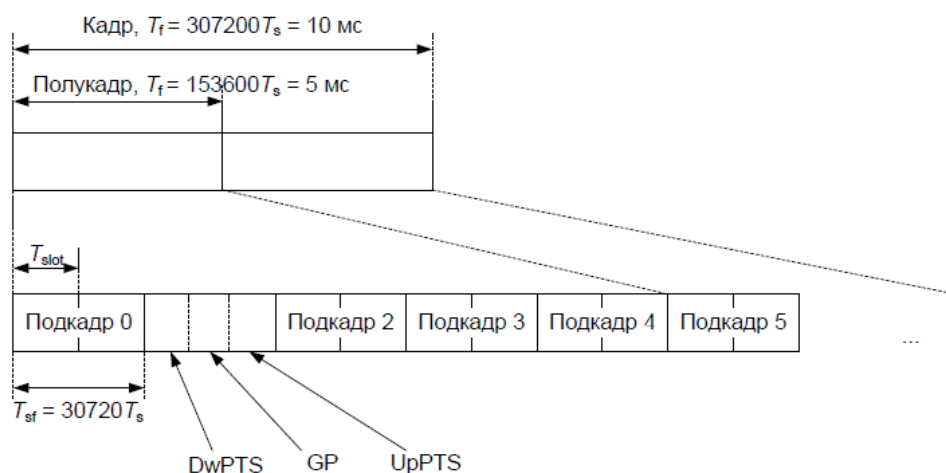


Рисунок 1.13 – Структура кадра Типа 2

Таблица 3 – Варианты конфигураций «восходящий»-«нисходящий»

Номер конфигурации	Периодичность точек переключения PTS	Номер подкадра									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 мс	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 мс	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 мс	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 мс	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 мс	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 мс	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

1.4 Технологии OFDM и SC-FDMA в сетях LTE

Особенностью радиointерфейса в линии «вниз» сети E-UTRAN является использование технологии множественного доступа OFDMA - мультиплексирование с ортогональным частотным разделением. Одна из основных целей использования технологии OFDMA является борьба с

помехами, вызванных многолучевым распространением сигнала, так как OFDM-сигнал рассматривается как множество медленно модулируемых узкополосных сигналов, а не как один быстро модулируемый широкополосный сигнал. Технология OFDM основана на формировании многочастотного сигнала, состоящего из множества поднесущих частот. При формировании OFDM-сигнала поток последовательных информационных символов длительностью $T_{\text{и}}/N$ разбивается на блоки, содержащие N символов; $T_{\text{и}}$ – длительность одного символа. Блок последовательных информационных символов преобразуется в блок параллельных символов, в котором каждый информационный символ соответствует определенной частоте многочастотного сигнала.

Практическая реализация ансамбля ортогональных многочастотных сигналов (для удовлетворения требований компенсации перекрывающихся спектров) прямым способом формирования показан на рисунке 1.14.

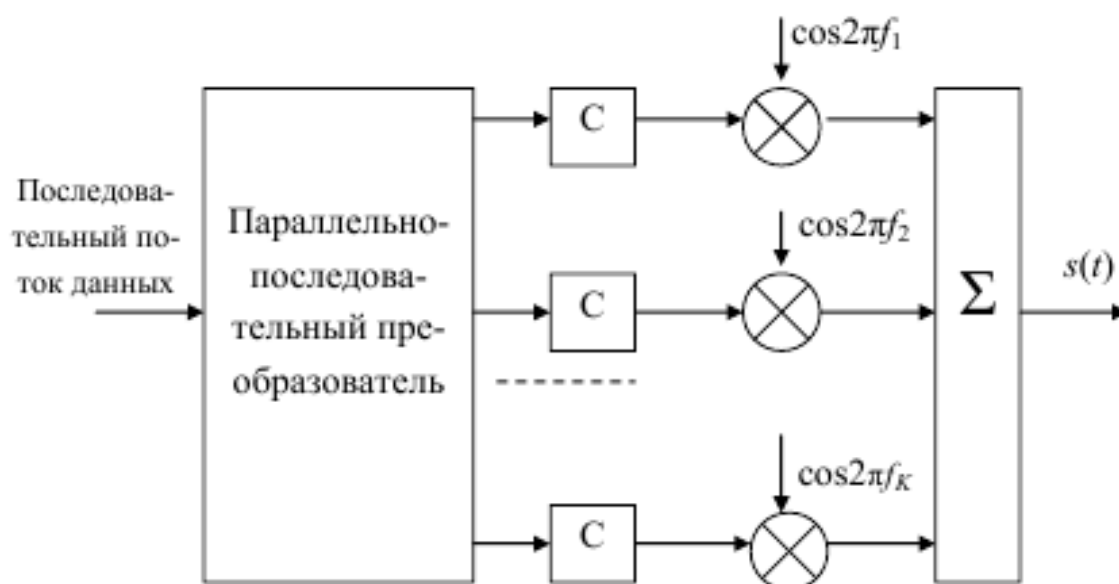


Рисунок 1.14 – Структурная схема прямого формирования OFDM-сигналов

Формирователь состоит из преобразователя последовательного потока данных в параллельный, синтезаторов C формы сигналов, обеспечивающих заданный вид огибающей, совокупности умножителей (преобразователей частоты), позволяющих перенести спектр сигналов на заданные частоты f_1, \dots, f_k , и сумматора Σ , на выходе которого и формируется многочастотный сигнал $s(t)$.

Другой подход, нашедший свое практическое воплощение в современных устройствах формирования и приема сигналов, основан на использовании специальной операции цифровой обработки сигналов – дискретного преобразования Фурье (ДПФ, DFT – Discrete Fourier Transform

– см. рисунок 1.15).

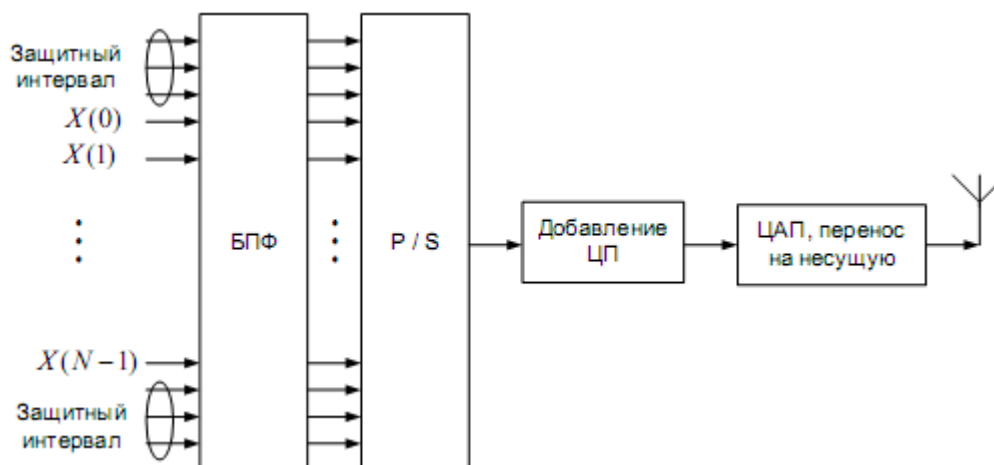


Рисунок 1.15 – Структурная схема формирования OFDM-сигнала с помощью ОБПФ

N комплексных модуляционных символов δk (сигнальные отсчеты в частотной области), а также G “пустых” (нулевых) символов, предназначенных для защитных поднесущих, поступают параллельным образом на вход блока ОБПФ, на выходе которого образуются отсчеты ($n = 0, \dots, N - 1$), представляющие собой отсчеты во временной области. После этого в пределах длительности интервала T_s к ним добавляется ещё G отсчетов последовательности $\{\xi\}$, образующие циклический префикс. Далее полученные отсчеты подаются на вход преобразователя частоты, реализующего на своём выходе высокочастотный радиосигнал.

В линии «вниз» сети E-UTRAN применяют следующие виды модуляции: QPSK, 16 QAM, 64 QAM. При формировании OFDM/QAM-сигнала используется дискретное обратное быстрое преобразование Фурье (ОБПФ).

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

Для формирования группового сигнала восходящих каналов в сетях LTE используется схема мультиплексирования с частотным разнесением с передачей на одной несущей SC-FDMA. Эта схема может работать в системах, функционирующих как в режиме TDD с временным дуплексированием, так и в режиме FDD с частотным дуплексированием. Такие сигналы можно рассматривать как одночастотные с модуляцией КФМ или ФМ-2 и временным мультиплексированием, подобные тем сигналам, которые формируются в системе GSM.

Формирование сигнала в частотной области согласно схеме, представленной на рисунке 1.16 позволяет использовать преимущество схемы

с ортогональным частотным разнесением, которое заключается в эффективном использовании частотного ресурса. При этом защитный интервал в частотной области между сигналами разных абонентов может быть опущен. Как и в системах с OFDM, во временной области периодически добавляется ЦП, но такая процедура проводится над блоком элементарных символов. Введение такого ЦП позволяет избежать МСИ между SC-FDMA символами или между блоками элементарных символов.



Рисунок 1.16 – Передача данных с использованием технологии SC-FDMA

Передаваемый сигнал занимает некоторую область частот, выделенную данному абоненту. Перераспределение частотного ресурса между абонентами может осуществляться при переходе к новому подкадру сигнала, каждый из которых имеет длительность 1 мс. Например, в какой-либо момент времени частотный ресурс, выделяемый абоненту, может быть удвоен, соответственно, удваивается и скорость передачи данных. Передаваемый сигнал будет занимать большую полосу частот, а длительность элементарного символа во временной области сократится.

Распределение частотного ресурса между абонентами осуществляется ресурсными блоками, каждому из которых соответствует полоса частот 180 кГц в частотной области, что при разносе между соседними поднесущими частотами в 15 кГц соответствует 12 поднесущим, и временной интервал 0,5 мс во временной области (1 слот). В режиме работы с нормальным циклическим префиксом ресурсный блок содержит 7 SC-FDMA-символов, а в режиме работы с расширенным циклическим префиксом – 6 SC-FDMA-символов.

Максимальное количество доступных ресурсных блоков зависит от выделенного системе диапазона частот, значение которого может достигать до

20 МГц, однако на краях выделенного диапазона предусмотрены защитные интервалы, которые не используются для передачи информации. Так, при выделении системе LTE полосы в 10 МГц реально будет использоваться только 9 МГц, что соответствует 50 ресурсным блокам.

1.5 Использование технологии MIMO в сетях LTE

MIMO (Multiple Input Multiple Output – множественный вход множественный выход) – это технология, используемая в беспроводных системах связи (WIFI, WI-MAX, сотовые сети связи), позволяющая значительно улучшить спектральную эффективность системы, максимальную скорость передачи данных и емкость сети.

Для организации технологии MIMO необходима установка нескольких антенн на передающей и на приемной стороне. Обычно устанавливается равное число антенн на входе и выходе системы, т.к. в этом случае достигается максимальная скорость передачи данных. Чтобы показать число антенн на приеме и передаче вместе с названием технологии «MIMO» обычно упоминается обозначение «AxV», где A – число антенн на входе системы, а V – на выходе.

Для работы технологии MIMO необходимы некоторые изменения в структуре передатчика по сравнению с обычными системами. Рассмотрим лишь один из возможных, наиболее простых, способов организации технологии MIMO. В первую очередь, на передающей стороне необходим делитель потоков, который будет разделять данные, предназначенные для передачи на несколько низкоскоростных подпотоков, число которых зависит от числа антенн. Например, для MIMO 2x2 и скорости поступления входных данных 200 Мбит/сек, делитель будет создавать 2 потока по 100 Мбит/сек каждый. Далее каждый из данных потоков должен быть передан через свою антенну. Обычно, антенны на передаче устанавливаются с некоторым пространственным разнесением, чтобы обеспечить как можно большее число побочных сигналов, которые возникают в результате переотражений. В одном из возможных способов организации технологии MIMO-сигнал передается от каждой антенны с различной поляризацией, что позволяет идентифицировать его при приеме. Однако в простейшем случае каждый из передаваемых сигналов оказывается промаркированным самой средой передачи (задержкой во времени, затуханием и другими искажениями).

На приемной стороне несколько антенн принимают сигнал из радиоэфира. Причем антенны на приемной стороне также устанавливаются с некоторым пространственным разнесением, за счет чего обеспечивается разнесенный прием. Принятые сигналы поступают на приемники, число которых соответствует числу антенн и трактов передачи. Причем на каждый из приемников поступают сигналы от всех антенн системы. Каждый из таких сумматоров выделяет из общего потока энергию сигнала только того тракта, за который он отвечает. Делает он это либо по какому-либо заранее

предусмотренному признаку, которым был снабжен каждый из сигналов, либо благодаря анализу задержки, затухания, сдвига фазы, т.е. набору искажений или «отпечатку» среды распространения. В зависимости от принципа работы системы (Bell Laboratories Layered Space-Time - BLAST, Selective Per Antenna Rate Control (SPARC) и т.д.), передаваемый сигнал может повторяться через определенное время, либо передаваться с небольшой задержкой через другие антенны. На рисунке 1.17 показан принцип организации технологии MIMO.

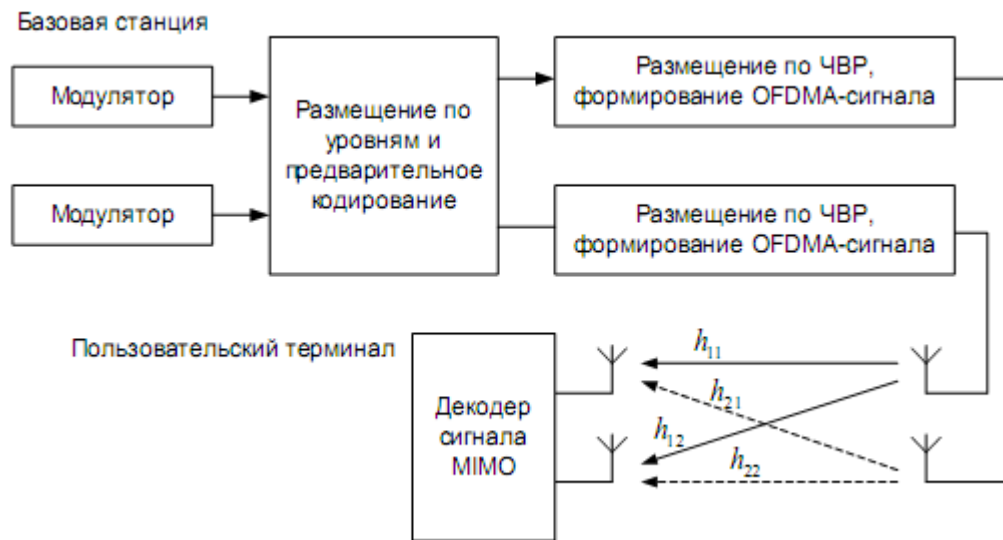


Рисунок 1.17 – Принцип организации технологии MIMO

MIMO-принцип позволяет уменьшить число ошибок при радиообмене данными (BER) без снижения скорости передачи в условиях их множественных переотражений сигналов. При этом многоэлементные антенные устройства обеспечивают:

- расширение зоны покрытия радиосигналами и сглаживание в ней мертвых зон;

- использование нескольких путей распространения сигнала, что повышает вероятность работы по трассам, на которых меньше проблем с замираниями, переотражениями и т.п.;

- увеличение пропускной способности линий связи за счет формирования физически различных каналов (разделенных пространственно, с помощью ортогональных кодов, частот, поляризационных мод).

Несмотря на короткий век, MIMO-направление развивается весьма многопланово и включает в себя разнородное семейство методов, которые можно условно классифицировать в соответствии с принципом разделения сигналов в приемном устройстве. При этом в MIMO-системах используются как уже зарекомендовавшие себя подходы к разделению сигналов, так и новые. К ним относятся, в частности, пространственно-временное,

пространственно-частотное, пространственно-поляризационное кодирование [14].

Схема формирования ММО-сигналов с помощью алгоритма RC MPD показана на рисунке 1.18 а) [3]. При этом использует две антенны на передающей стороне и одна антенна на приемной стороне. Высокоскоростной поток данных разбивается на два потока, имеющих одинаковую скорость. При формировании ММО-сигналов на выходе передающих антенн используется пространственно-временной код STTD (Space-Time Transmit Diversity – см. рисунок 1.18 б).

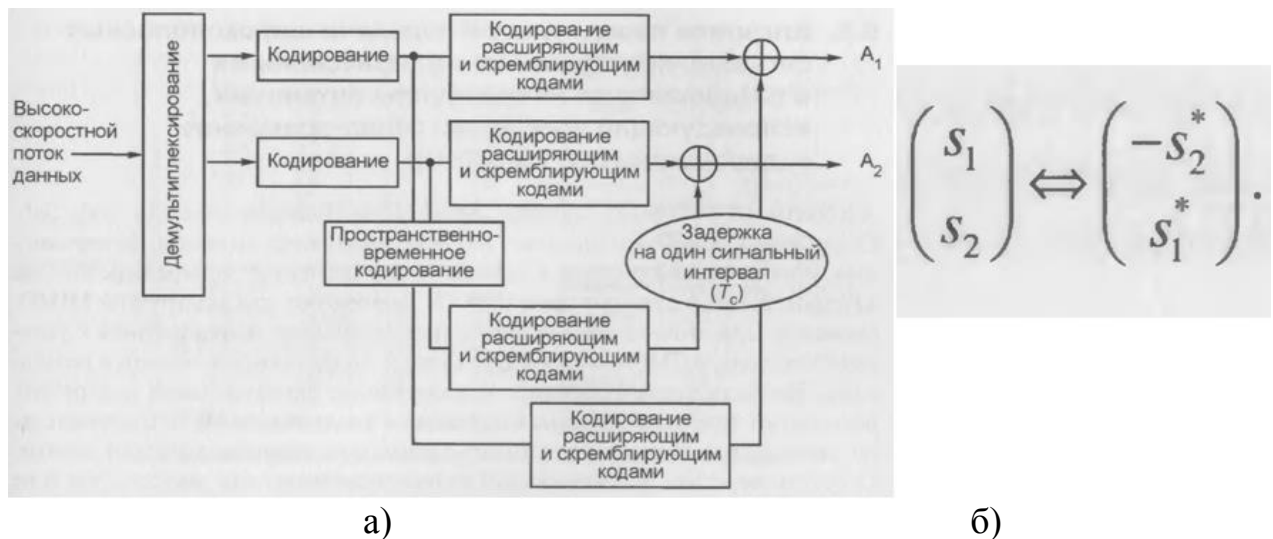


Рисунок 1.18 – Схема формирования ММО-сигналов с помощью алгоритма RC MPD

Как показывает практика, использование большого числа приемных антенн в линии «вниз» ограничено массогабаритными характеристиками абонентского терминала, емкостью батареи. Поэтому алгоритмы, которые позволяют работать с несколькими передающими и одной приемной антенной, представляют значительный интерес.

Пространственно-временное турбокодирование (Spatial Temporal Turbo Channel Coding – STTCC) – это технология, позволяющая при одной приемной антенне оптимально комбинировать методы кодирования и модуляции, а также пространственного мультиплексирования для обеспечения высокой скорости передачи данных.

Схема передающего устройства с одним турбокодером STTCC показана на рисунке 1.19. Входной поток данных кодируется пространственным STTCC-кодом, в результате чего формируется множество параллельных подпотоков данных. Далее эти подпотоки подвергаются перемежению и расширению ортогональным кодом OVSF. Результирующие сигналы скремблируются одним кодом и передаются в эфир.

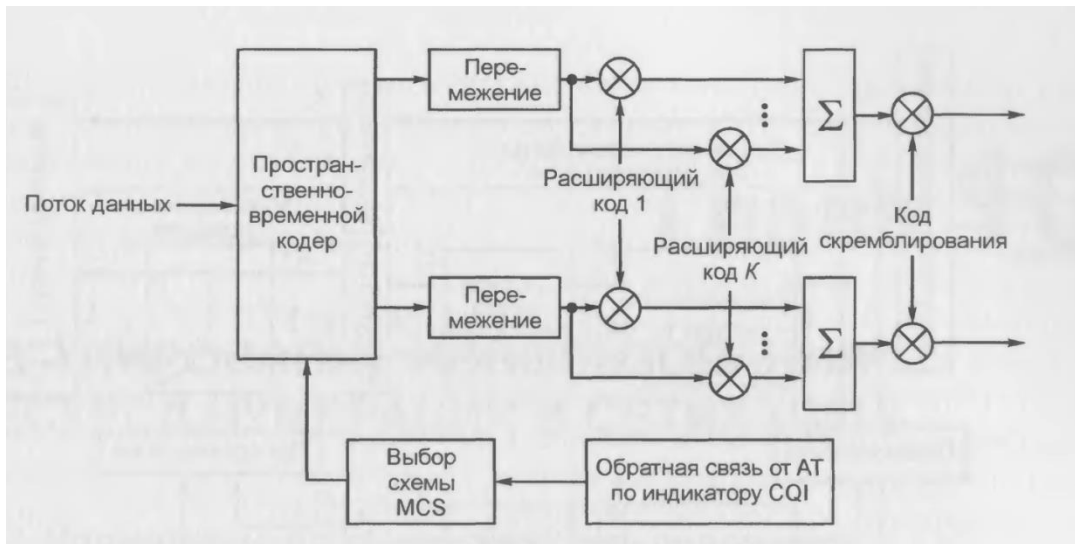
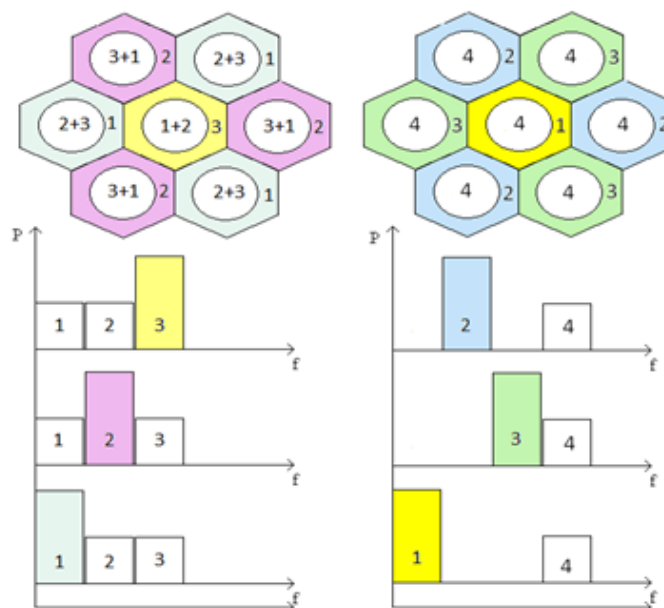


Рисунок 1.19 - Схема передающего устройства с одним турбокодером STCC

1.6 Частотное планирование сети LTE

Технология OFDMA позволяет управлять мощностью передаваемых eNB поднесущих, в связи с чем становится возможным применение различных методов повторного использования частот. Наибольший интерес представляют мягкое и дробное, так как они повышают пропускную способность каналов. При мягком повторном использовании частот (ПИЧ) коэффициент повторного использования стремится к единице, то есть, в каждой соте может использоваться вся полоса системы. При дробном ПИЧ коэффициент меньше единицы [22].



а) мягкое, 3 поднесущих

б) дробное, 4 поднесущих

Рисунок 1.20 – Варианты повторного использования частот

2 Краткая характеристика оборудования сетей LTE

На сегодняшний день среди всех решений различных компаний-производителей коммутационного оборудования для реализации сети LTE выделяются решения двух компаний: «CiscoSystems» и «Alcatel – Lucent».

Сети связи различных операторов используют различную аппаратуру, поэтому на рисунке 2.1 представлена сеть, в которой на разных уровнях задействуется как оборудование :«CiscoSystems», так и «Alcatel – Lucent».

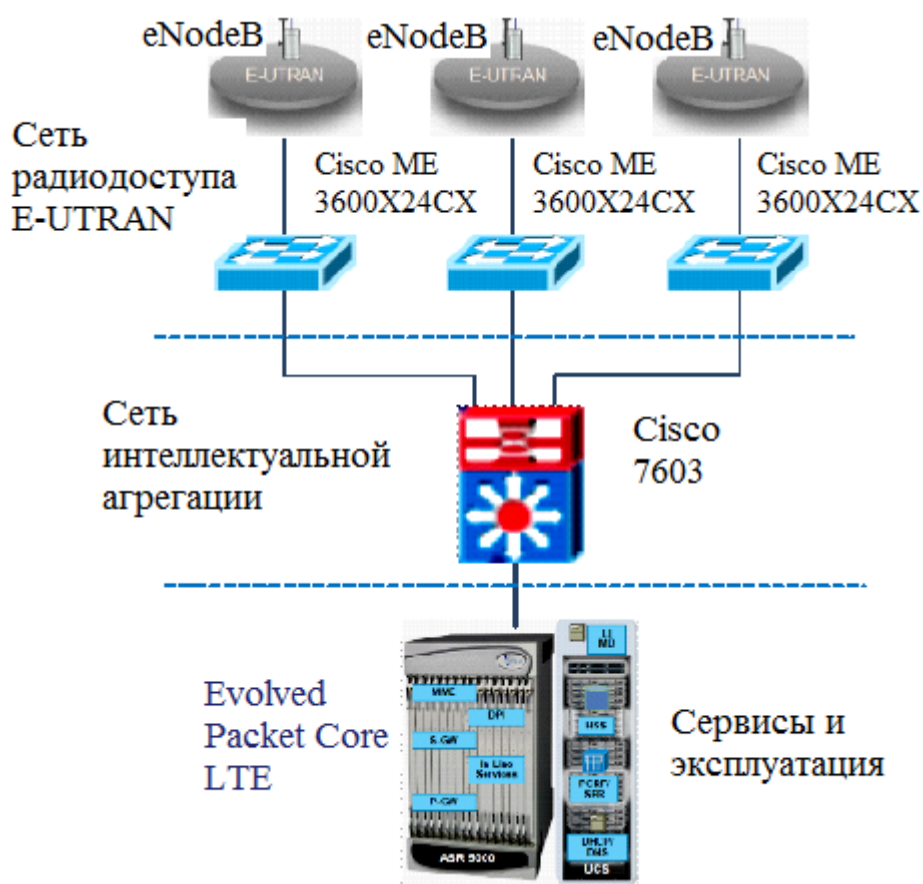


Рисунок 2.1 – Схема организации сети связи LTE

2.1 Управляющее оборудование сети LTE

Управление абонентскими сессиями и услугами в сетях LTE осуществляется с помощью базовой пакетной сети EPC (EvolvedPacketCore). Сеть EPC содержит следующие узлы и логические элементы (см. рисунок 2.2):

1) MME (MobilityManagementEntity) – узел управления мобильностью – отвечает за решение задач управления мобильностью абонентского терминала, управления безопасностью мобильной связи (NASSecurity), управления службой передачи данных;

- 2) SGW (ServingGateway) – обслуживающий шлюз сети LTE – отвечает за обработку и маршрутизацию пакетных данных поступающих из/в подсистему базовых станций;
- 3) PGW (PublicDataNetworkGateway) – шлюз от/к сетей других операторов – отвечает за передачу голоса и данных из/в сети оператора LTE в другие сети 2G, 3G, не-3GPP и Internet;
- 4) HSS (Home Subscriber Server) – сервера абонентских данных;
- 5) PCRF (PolicyandChargingRulesFunction) – узел выставления счетов абонентам за оказанные услуги;
- 6) DHCP/DNS – сервер выделения IP-адресов.

Маршрутизатор «CiscoASR 5000 PCS3» специально разработан для мобильных широкополосных сетей. Он отличается распределенной архитектурой, встроенными интеллектуальными функциями, масштабируемостью и надежностью.

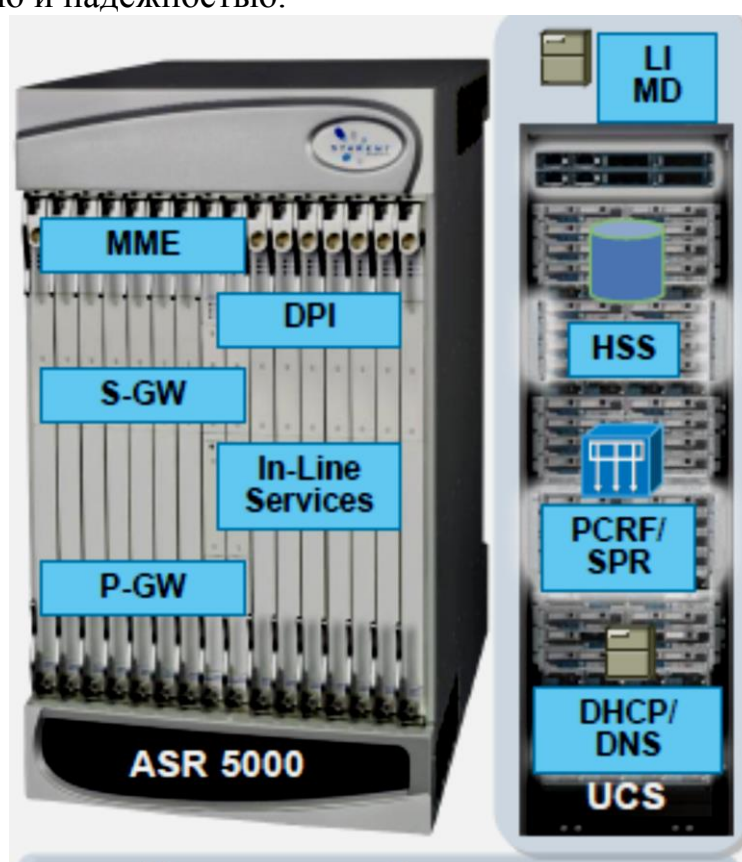


Рисунок 2.2 – Решение компании "CiscoSystems" по объединению функций сети EPC на базе одной платформы "CiscoASR 5000 PCS3"

Платформа «CiscoASR 5000 PCS3» позволяет оператору связи наращивать производительность и емкость без массовых закупок дополнительного оборудования. Маршрутизатор «CiscoASR 5000 PCS3» в своих сетях используют более 250 операторов мобильной связи в мире.

Оборудование интеллектуальной агрегации (см.рисунок 2.3).

Оптический маршрутизатор (OpticalServiceRouter) «Cisco 7603 OSR» предназначен для построения территориально распределенных (WAN) и городских (MAN) сетей. Основной задачей данного маршрутизатора является обеспечение работы критичных IP приложений на скорости оптических каналов связи.



Рисунок 2.3 – Внешний вид маршрутизатора "Cisco 7603 OSR"

Основные возможности и технические характеристики маршрутизатора «Cisco 7603 OSR»:

- 1) поддержка полного спектра функций ПО CiscoIOS;
- 2) шасси, совместимое со стандартом NEBS;
- 3) высокая доступность платформы благодаря резервированию блоков питания, управляющих модулей и программных возможностей ПО CiscoIOS – GlobalResilienceIP;
- 4) аппаратное ускорение сетевых услуг благодаря технологии CiscoPXF;
- 5) поддержка технологии MPLS/IP;
- 6) имеет 24 порта 10 Base-FL, 24 порта 10Base-FX, 48 портов 1000 Base-LX, 4 порта 10GBase-ER;
- 7) максимальная производительность: 240 Гбит/с, 30 млн. пакетов/с;
- 8) пропускная способность шины: 32 Гб/с;
- 9) размеры (в×ш×д): 17,78×44,12×55,25;
- 10) вес: 12,25 кг;
- 11) питание: AC 110 - 240 В, DC 48 - 60 В;
- 12) среднее время наработки на отказ: 7 лет;
- 13) условия эксплуатации: температурный режим 0 – 40 °С, влажность 10 – 85%.

2.2 Оборудование сети радиодоступа

Коммутатор «CiscoME 3600 X 24CX» (см. рисунок 2.4) реализован с учетом огромного опыта работы компании «CiscoSystems» с операторами

мобильной связи; данная модель обладает аппаратным ускорением, неблокируемой производительностью, низкими задержками и джиттером.

Чипсет коммутатора «CiscoME 3600 X 24CX» разработан специально для сетей CarrierEthernet.



Рисунок 2.4 – Внешний вид коммутатора "CiscoME 3600 X 24CX"

Краткая техническая характеристика коммутатора «CiscoME 3600 X 24CX»:

- 1) количество оптоволоконных портов: 6;
- 2) организация IP-маршрутизации;
- 3) поддерживаемые скорости: 10/100/1000 Мбит/с;
- 4) размеры (ш×г×в): 444×516×43;
- 5) вес: 6570 грамм;
- 6) протокол управления: SNMP;
- 7) протоколы передачи данных: OSPF, IS-IS, EIGRP, RIPv2;
- 8) оперативная память: 1024 МБ;
- 9) тип оперативной памяти: DRAM;
- 10) потребляемая мощность: 228 Вт;
- 11) частота входного сигнала: 50/60 Гц;
- 12) входное напряжение: перем. 100-240 В, пост. 48 В;
- 13) пропускная способность: 65 Mpps;
- 14) максимальная скорость передачи данных: 44 Гбит/с;
- 15) fiberethernetcablingtechnology: 1000 Base-LX, 100 Base-BX, 100 Base-FX, 100 Base-LX;
- 16) fiber optic connector: LC, LX-5;
- 17) дистанция передачи по оптико-волоконному кабелю: 80 км;
- 18) длина волны: 1310/1550 нм.

Коммутатор «CiscoME 3600 X 24CX» не исключает возможности подключения к нему нескольких базовых станций eNB.

Оборудование базовых станций (eNodeB).

Базовые станции LTE содержат радиомодули (приемопередатчики, TRX), блок цифровой обработки сигнала (BBU), интерфейсные платы (FE/GE

порты, электрические, оптические). Радиомодули бывают выносные — RRU. Они монтируются вблизи антенны (для уменьшения потерь в ВЧ-фидере), к BBU подключаются с помощью оптического кабеля (стандарт CPRI). Называются evolved NodeB (дословно — продукт эволюции узла B).

БС разных стандартов больше похожи, чем отличаются, поэтому производители начали выпуск универсальной БС на 3 стандарта: GSM, 3G и LTE под названием SingleRAN. Это очень удобно оператору с точки зрения экономии места и питания на сайте, сокращения времени на монтаж и так далее. Одна из БС «Alcatel – Lucent», показана на рисунке 2.5 [15].

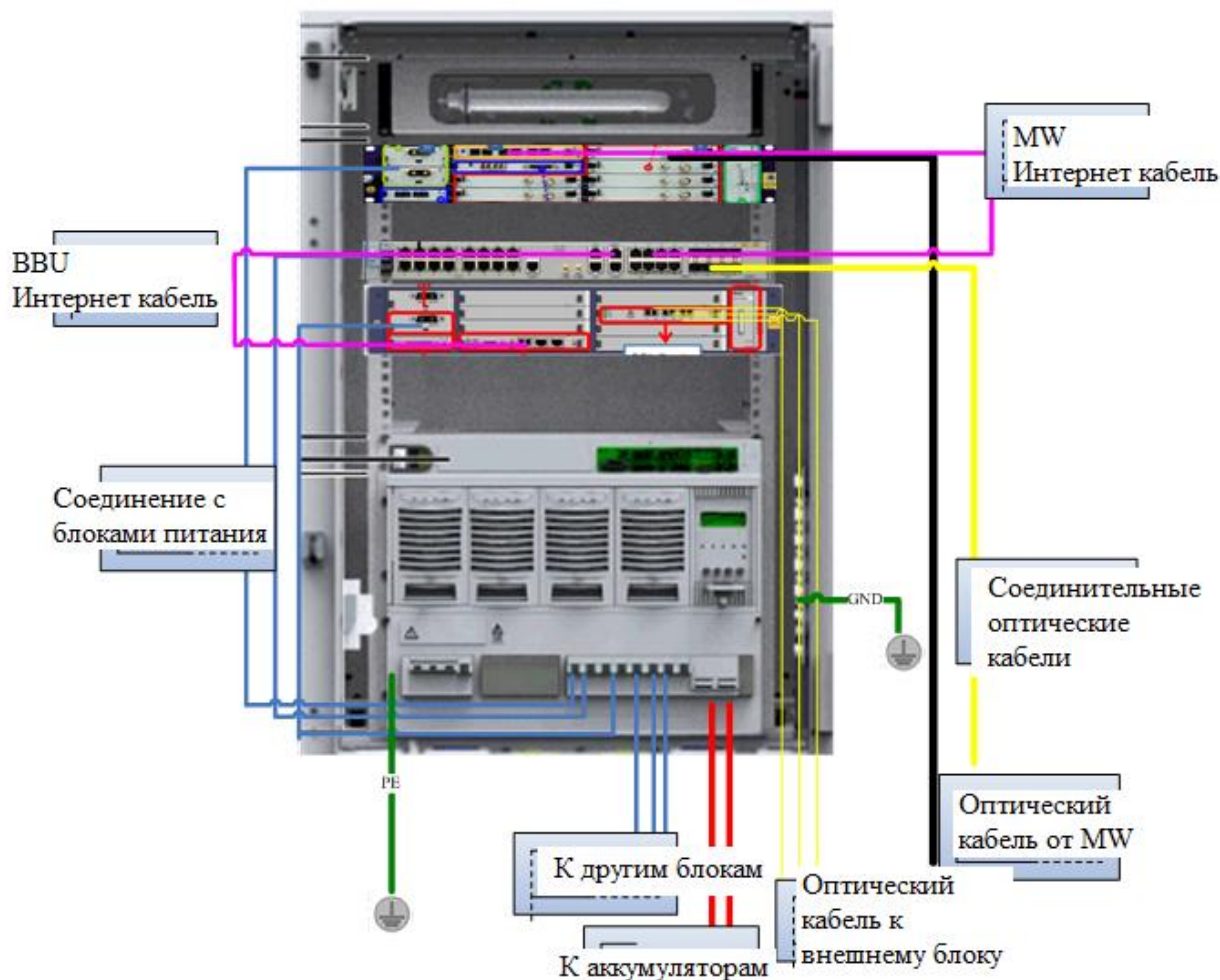


Рисунок 2.5 – Шкаф БС фирмы «Alcatel – Lucent»

2.4 Антенны

Для LTE не используются обычные панельные антенны с кросс-поляризацией. Они, например, используются в сетях GSM и в 3G. Если в GSM и 3G две поляризации обычно используются на прием, а на передачу только одна (схема 2Rx/1Tx), то в LTE обе поляризации задействованы и на прием, и на передачу (схема 2Rx/2Tx). Это необходимо для реализации технологии

MIMO2x2. Главное разнести антенны в пространстве на достаточное расстояние (порядка 10 длин волн).

Основу антенного парка сетей GSM/UMTS/LTE в настоящее время составляют панельные антенны с кроссполяризацией (X-pol) и антенны с вертикальной поляризацией (V-Pol).

Антенны с кроссполяризацией используются в основном для организации покрытия вне помещений. Антенны с вертикальной поляризацией (V-pol) в сетях UMTS используются в основном для организации покрытия внутри помещений (indoor). Антенны V-pol выпускаются как направленные, так и всенаправленные.

Основной парк антенн для UMTS составляют широкополосные антенны (X-pol broadband 1710 – 2170 МГц), сдвоенные широкополосные (XX-pol Quadpol broadband), позволяющие одновременно работать в UMTS и GSM1800, двухдиапазонные (XX-pol dualband), для одновременной работы в UMTS и в GSM900 и трехдиапазонные антенны (XXX-pol tripleband), работающие в диапазонах UMTS/GSM900/1800. Кроме того, на рынке представлены трехсекторные антенны (X-pol Tri-sector), которые выпускаются как одно-, двух- и трёхдиапазонные [16].

Спецификой сетей UMTS, в отличие от сетей GSM, является, как известно, их динамический характер, т.е. изменение площади покрытия в зависимости от нагрузки, а также небольшие по площади зоны покрытия, которые при обслуживании вызывают проблему оптимизации handover зон.

При нахождении абонента в зоне действия нескольких базовых станций (БС) имеет место так называемый soft handover, когда абонентская станция использует ресурс нескольких сот, увеличивая нагрузку на сеть. Увеличение зоны "мягкого хэндовера" уменьшает общую емкость сети, а значит, снижает уровень обслуживания и качество предоставляемых услуг, особенно услуг высокоскоростной передачи данных, предъявляющих повышенные требования к качеству покрытия.

Одним из наиболее эффективных инструментов оптимизации площади покрытия является ограничение излучаемой антенной мощности и обеспечения более четкой границы зоны покрытия путём управления углом наклона диаграммы направленности (ДН) антенны в вертикальной плоскости.

В антеннах UMTS имеется возможность как механической, так и электрической регулировки угла наклона ДН. Электрический наклон предпочтителен, поскольку не вызывает искажения формы ДН в горизонтальной плоскости и азимутальной зависимости угла наклона и коэффициента усиления антенны, что позволяет достичь нужной концентрации мощности излучения по периметру зоны покрытия. В результате, обеспечивается возможность четкого позиционирования краёв зоны покрытия в зависимости от уровня мощности излучения для конкретной услуги, что важно при обеспечении высококачественных услуг высокоскоростной передачи данных.

Антенны выпускаются как с фиксированным углом наклона, так и с возможностью регулировки его на месте или дистанционно. Все новейшие антенные системы для сетей UMTS реализуют функции дистанционного управления углом наклона ДН с помощью специальных модулей подключаемых ко встроенным фазовращателям. Управление такими модулями осуществляется с блока управления, располагаемого на БС, или от общей системы управления сетью, что позволяет динамически изменять зону обслуживания в зависимости от нагрузки на конкретный сектор БС.

Типовые значения КУ и ширины ДН в вертикальной плоскости в зависимости от длины корпуса антенны приведены в таблице 2.1:

Таблица 2.2 – Параметры антенн GSM/UMTS/LTE

Ширина ДН в горизонтальной плоскости		65°				90°			
		0,7 м	1,3 м	2,0 м	2,6 м	0,7 м	1,3 м	2,0 м	2,6 м
Коэффициент усиления / Ширина ДН в верик. пл.	900	12,5 dBm 26°	15 dBm 14,2°	16,5 dBm 9°	17,5 dBm 7°		14 dBm 14°	15,5 dBm 9°	16,3 dBm 6,9°
	1800	15,1 dBm 15°	17,5 dBm 7°	19 dBm 4,7°		13,6 dBm 14,7°	16,2 dBm 7,1°	17,5 dBm 4,7°	
	2100	15,8 dBm 13°	18,2 dBm 6,3°	19,5 dBm 4,2°		14,1 dBm 13,2°	16,7 dBm 6,3°	17,9 dBm 4,2°	

Внешний вид антенны диапазона 1700 – 1900 МГц с регулируемым углом электрического наклона показан на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Внешний вид антенны с регулируемым углом электрического наклона

3 Исследование эффективности внедрения технологии LTE в г. Алматы

При исследовании эффективности внедрения сети связи технологии LTE в г. Алматы необходимо определить емкость сети: необходимое количество базовых станций (ББС) и то количество абонентов, которое они могут обслужить с учетом требований стандартов по качеству обслуживания.

При определении количества БС требуется учитывать особенности распространения радиосигнала в условиях города. Для этого требуется довольно обширный набор исходных данных, достоверность которых может существенно повлиять на адекватность принимаемого решения.

Выполняется расчет пространственных параметров сети, а именно, *бюджета потерь* – показателя, характеризующего допустимые потери в радиолинии для заданного стандарта сотовой мобильной связи.

Расчетные данные сравниваются с результатами натурных измерений, что позволяет уточнить методику расчета сети и оптимизировать ее.

3.1 Анализ подхода к оценке распространения радиосигнала в сети LTE (на примере БС г. Алматы)

В сотовых системах подвижной радиосвязи выделяют несколько этапов строительства [17]. Основными этапами планирования являются этап разработки частотного плана и расчёта пропускной способности и этап настройки системы. Данные этапы являются единственными, где проводится расчёт прогнозируемых зон обслуживания базовыми станциями (БС), интерференционный анализ и оценка распределения напряжённости поля.

В связи с раздельностью этих этапов, существует несколько различных методов анализа радиочастотного покрытия. На этапе планирования для предварительной оценки зон обслуживания используются различные модели распространения радиоволн, на основе которых разрабатываются мощные средства расчёта и прогнозирования радиочастотной обстановки. Но, как показывает практика [18], разработанные модели должны быть адаптированы под исследуемые районы (внесены корректирующие данные в затухание сигнала). Несмотря на мощность средств расчёта, все факторы, определяющие точность определения зон обслуживания, учесть невозможно. Следовательно, точность определения распределения напряженности поля от этого страдает.

Применение современных систем автоматизированного проектирования сетей подвижной радиосвязи не даёт удовлетворительных результатов. Это связано с тем, что многие модели, заложенные в системы проектирования, являются эмпирическими или полуэмпирическими, следовательно, приближёнными моделями. Причём, невозможно в данные модели заложить всю информацию об исследуемом районе (плотность застройки, тип материалов застройки, высотную модель застройки). Если же последние факторы в какой-то степени являются детерминированными, то такие

факторы, как погодные условия, движущиеся объекты, влияющие на распространения радиосигналов, случайны и не могут быть заложены в данные модели. Отсюда следует, что усовершенствование моделей, заложенных в системы проектирования зон обслуживания базовыми станциями в системах подвижной радиосвязи, является перспективным.

Существуют следующие подходы к оценке зон обслуживания базовыми станциями в системах подвижной радиосвязи и делятся на несколько различных групп, которые в той или иной степени применяются на различных этапах построения и обслуживания сетей подвижной радиосвязи:

1. Натурные измерения напряжённости поля. Данный подход основан на постоянном мониторинге распределения напряжённости поля посредством проведения натурных измерений напряжённости поля. Измерениям напряжённости поля посвящены работы [18,19].

В сетях подвижной связи широко применяются измерения зон охвата. Такие измерения, как правило, проводятся на этапе планирования, а также в ходе эксплуатации для анализа помех, при техническом обслуживании сети, при анализе её расширения и для уточнения зон охвата, в ходе проверки смоделированных с помощью компьютера зон радиоохвата.

Термин «измерение напряжённости поля» относится к трём основным категориям измерений [19]:

1) Измерения, которые проводятся с использованием переносных или подвижных установок для получения относительно мгновенных или кратковременных данных с одного или нескольких положений.

2) Измерения, которые проводятся с помощью подвижных установок для получения статических параметров зоны охвата в зоне действия подвижной станции.

3) Длительные измерения, предусматривающие запись напряжённости поля и анализ записанных диаграмм [20].

Интенсивность сигнала между базовой станцией и принимающими устройствами (не обязательно мобильными, т.к. это могут быть стационарные точки доступа к Интернет) должна быть достаточно высокой, чтобы поддерживать качество сигнала на приемнике, но при этом не слишком высокой, чтобы не создавать сильной интерференции с каналами других ячеек, которые используют ту же полосу частот. Интенсивность сигнала является переменной величиной и ведет себя как функция расстояния от базовой станции до точки в пределах ячейки. При проектировании сотовой сети должны учитываться эффекты распространения сигнала: максимальный уровень мощности передачи на базовой станции и чувствительности на принимающем устройстве; высота антенны принимающего устройства; высота антенны базовой станции. В условиях г. Алматы необходимо также учитывать пересеченный характер местности [21].

Произведем расчет зоны покрытия БС по модели Окумура-Хата и сравним результаты напряженности поля с измеренными значениями с помощью моделирующей программы Atoll.

Проанализируем зависимость радиуса зоны покрытия как от высоты подвеса антенны БС, так и от высоты приемной антенны, т.к. приемные устройства сети LTE могут располагаться на высоте. Отличной от 1,5 м, заявленной в модели Окумура-Хата.

Результаты анализа сравним с экспериментальными данными, полученными для двух БС с разными высотами подвеса антенн, т.к. на территории большого города, каким является Алматы имеется густонаселенный центр с высотными зданиями и обширные районы с низкоэтажной застройкой и, в соответствии с рекомендациями [22], а же на основании практического опыта проектирования сетей связи соты имеют различные размеры (радиусы зоны охвата).

Расчет начинается с решения уравнения передачи для определения суммарных потерь на трассе распространения радиоволн.

Расчет уравнения передачи.

Основу территориального планирования составляет энергетический расчет, в процессе которого определяется архитектура сети и ее пространственные координаты с учетом качества обслуживания и информационной нагрузки. Заданное качество принятого сигнала определяется чувствительностью приемника [23,24].

$$P_{ПРМ} = \frac{P_{ПРД} \cdot \eta_{ФПРД} \cdot G_{АПРД} \cdot \xi_{П} \cdot G_{АПРМ} \cdot \eta_{ФПРМ} \cdot \xi_{С}}{L_{\Sigma}} \quad (3.1)$$

где $P_{ПРМ}$ – мощность радиосигнала на входе приемника (определяется чувствительностью приемника);

$P_{ПРД}$ – мощность передатчика;

$\eta_{ФПРД}$, $\eta_{ФПРМ}$ – КПД передающего и приемного фидеров;

$G_{АПРД}$, $G_{АПРМ}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;

$\xi_{П}$, $\xi_{С}$ – коэффициенты согласования антенн с радиосигналом по поляризации;

L_{Σ} – суммарное затухание радиоволн на трассе.

Значение мощности радиосигнала на входе приемника удобно выражать в децибелах относительно мВт. При этом уравнение (3.1) принимает вид:

$$P_{ПРМ}(\text{дБ/Вт}) = P_{ПРД}(\text{дБ/Вт}) + \eta_{ФПРМ}(\text{дБ}) + G_{АПРД}(\text{дБ}) + \xi_{П}(\text{дБ}) + G_{АПРМ}(\text{дБ}) + \eta_{ФПРМ}(\text{дБ}) + \xi_{С}(\text{дБ}) - L_{\Sigma}(\text{дБ}) \quad (3.2)$$

По этой формуле определяются суммарные энергетические потери, возникающие на трассе распространения радиоволн:

$$L_{\Sigma}(\text{дБ}) = P_{ПРД} + \eta_{ФПРД} + G_{АПРД} + \xi_{П} + G_{АПРМ} + \eta_{ФПРМ} + \xi_{С} - P_{ПРМ} \quad (3.3)$$

Требуемые стандартные значения параметров БС и принимающего устройства (ПС) приведены в таблице 3.1.

Т а б л и ц а 3.1 – Стандартные значения параметров БС и ПС

Обозначение	Наименование и единица измерения	Значение
$P_{\text{ПРД БС}}$	Мощность передатчика БС, дБм	17
$G_{\text{ПРД БС}}$	К-т усиления передающей антенны БС, дБм	15,1
$f_{\text{ПРД БС}}$	Полоса рабочих частот передачи БС, ГГц	1805-1880
$P_{\text{ПРМ БС}}$	Чувствительность приемника ПС, дБм	-101
$G_{\text{ПРМ БС}}$	К-т усиления приемной антенны ПС, дБ	2

Рельеф местности в зоне обслуживания $\Delta h_{\text{БС}}$ системы подвижной радиосвязи определяется по карте местности с учетом расположения односекторной антенны в месте расположения БС.

Коэффициент согласования антенны с радиосигналом по поляризации (для передатчика и приемника) $\xi_{\text{П}} = \xi_{\text{С}} = 0,9$.

КПД передающего и приемного фидеров $\eta_{\text{ФПРД}} = \eta_{\text{ФПРМ}} = 0,9$.

Предполагаемый метод расчета эмпирический. Следует иметь в виду, что расчеты дают удовлетворительный результат для достаточно протяженного участка местности, охватывающего всевозможные неровности.

$$L_{\Sigma}(\text{дБ}) = 17 + 0,9 + 15,1 + 0,9 + 2 + 0,9 + 0,9 + 101 = 146,8 \text{ дБ.}$$

Определим суммарное затухание (суммарные потери) радиоволн как потери распространения для соответствующего типа местности $L_{\text{Р}}$ и поправки, учитывающей рельеф местности $L_{\text{РЕЛ}}$

$$L_{\Sigma} = L_{\text{Р}} + L_{\text{РЕЛ}}. \quad (3.4)$$

Определим поправку, учитывающей рельеф местности.

Оценка неровности местности.

Для оценки степени вероятности местности используют параметр Δh , который определяется как разница высот (отметок) местности, превышаемых на 10 и 90% на определенном расстоянии [21]. В документах МККР (Рекомендации 370-4) это расстояние рекомендуется отсчитывать в пределах 10...50 км в направлении от передатчика к точкам приема. В документах ОИРТ его рекомендуют брать в пределах 30...40 км от приближенно предполагаемой границы зоны приема в сторону передающей станции. Второй подход предпочтителен, поскольку на уровень сигнала гораздо сильнее влияют неровности местности, расположенные перед приемными антеннами. Если радиус зоны приема передающей станции меньше 30 км, то параметр определяется по всему радиусу. На наклонных трассах следует отсчитывать от линии, проходящей через середину неровностей.

Значение Δh удобно найти из статистического распределения высот предметов на местности. Выбор высот должен быть таким, чтобы они

охватывали все крупные предметы (детали рельефа). Обычно бывает достаточно взять 30 значений высот через 1 км.

По грубой оценке параметр Δh равен половине среднего значения высот холмов или гор от подошвы до вершины на рассматриваемом участке.

Параметр Δh , м, позволяет ввести условную классификацию типов местности:

	Δh , м
Равнинная или водная поверхность	0...25
Равнинно-холмистая (среднепересеченная)	25...75
Холмистая (сильнопересеченная).....	75...150
Гористая	150...400
Очень высокие горы, не менее	400



Рисунок 3.1 – Рельеф местности в направлении азимутов антенн на БС 1

Рельеф местности (см. рисунок 3.1) показывает, что параметр Δh , м составляет почти 400 м и, следовательно, поправка на рельеф, полученная интерполированием между кривыми для $R < 100$ км (см. рисунок 3.2) $V_{\text{рел.}} = 18$ дБ [21].

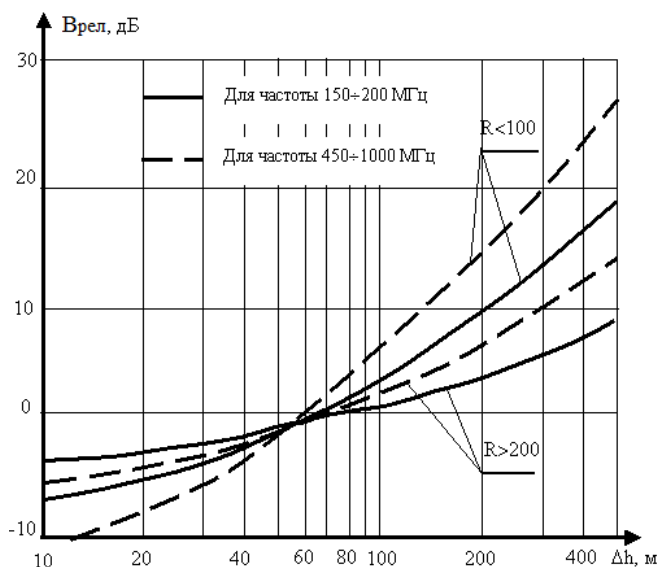


Рисунок 3.2 – Зависимость поправочного коэффициента γ степени неровности поверхности

Стандартное отклонение распределения напряженности поля по местоположению согласно Рекомендации 370-4 зависит от степени неровности местности и диапазона частот. Для равнинно-холмистой местности в дециметровом диапазоне $V_{\text{рел.}} 9,3$ дБ. Для холмистой и гористой местности в метровом диапазоне данных нет, а в дециметровом диапазоне они ограничены (при $\Delta h = 150, 300\text{м}, 400\text{м}$ $V_{\text{рел.}}=13,3; 16$ и 24 дБ соответственно).

Экспериментальные исследования, проведенные для многих районов, показывают, что для расстояний свыше 10 км значения стандартного отклонения можно определить по формуле для дециметрового диапазона волн, дБ:

$$V_{\text{рел.}} = 9,5 \lg \left(\frac{\Delta h}{50} \right) + 9 \quad (3.5)$$

$$V_{\text{рел.}} = 9,5 \lg \left(\frac{\Delta 400}{50} \right) + 9 = 17,6 \text{ дБ.}$$

Результаты расчета практически совпадают с результатами, полученными графическим способом. Принимаем $V_{\text{рел.}} = 17,6$ дБ.

Т.к. БС установлены в местах с различной плотностью застройки, поэтому в (3.4) следует ввести коэффициент $V_{\text{заст.}}$, учитывающий дополнительное ослабление, зависящий от плотности застройки города и характера расположения зданий. Высота строений и строительный материал оказывают сравнительно небольшое влияние [21].

Плотность застройки города (или квартала) определяют по плану как отношение застроенной части к общей площади (см. рисунок 3.3).

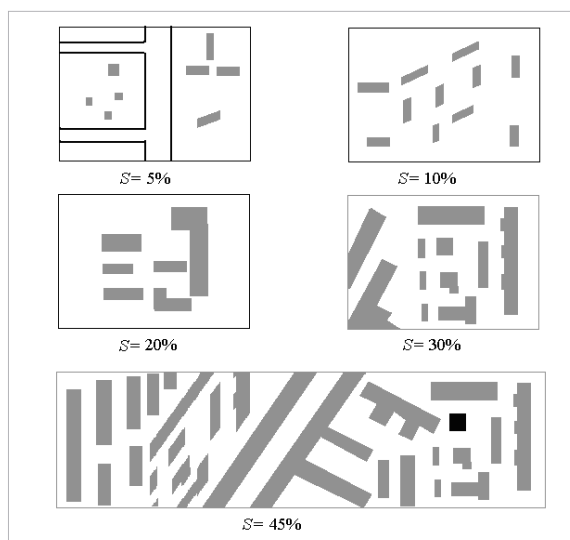


Рисунок 3.3 – Примеры плотности застройки города

Из рисунка 3.4 видно, что дополнительное ослабление $V_{\text{заст.}}$ для дециметрового диапазона волн изменяется в больших пределах.

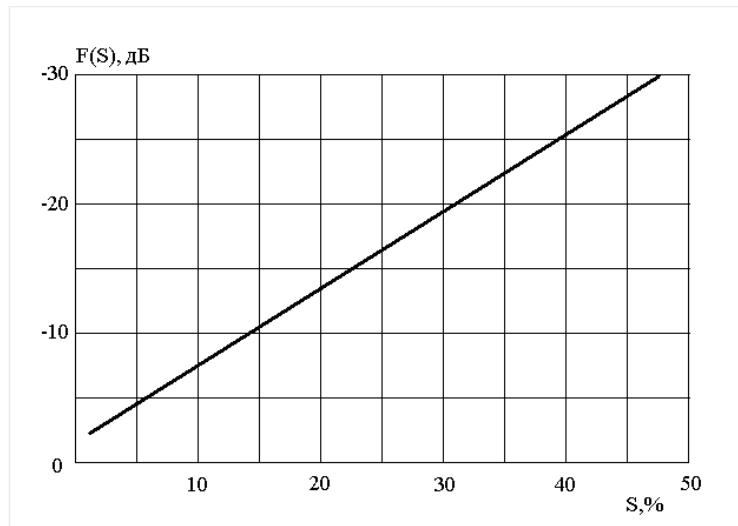


Рисунок 3.4 – Зависимость дополнительного ослабления напряженности поля в городе от плотности застройки; дециметровый диапазон волн $r=1 \dots 10$ км

Для БС 1, расположенной в центре города плотность застройки принимаем равной 45%, поэтому $V_{заст.} = -28$ дБ.

Формула (3.4) приобретает вид:

$$L_{\Sigma} = L_p + B_{рел.} - V_{заст.} \quad (3.6)$$

Отсюда

$$L_p = L_{\Sigma} - L_{рел.} + L_{заст.} \quad (3.7)$$

$$L_p = 146,8 - 18 - 28 = 100,8 \text{ дБ.}$$

Исследуем зависимость величины потерь от таких переменных параметров, как высота подвеса антенны БС и высота подвеса принимающей антенны [20].

Наиболее известной и используемой является модель предсказания Окомура и Хата. Эта формула (метод прогнозирования Окомура) имеет следующий вид [24]

$$L_p = \begin{cases} A + B \lg(r) & \text{для городской зоны,} \\ A + B \lg(r) - C & \text{для пригородной зоны,} \\ A + B \lg(r) - D & \text{для открытой местности} \end{cases} \quad (3.8)$$

где r – расстояние между антеннами базовой и подвижной станции, км.

Радиочастота несущей f_0 , МГц, высота антенны базовой станции h_b , м и высота антенны подвижной станции h_m , м; величины A , B , C и D выражаются соответственно следующим образом

$$A = A(f_0, h_b, h_m) = 69.55 + 26.16 \log(f_0) - 13.82 \log(h_b) - a(h_m), \quad (3.9)$$

$$B = B(h_b) = 44.9 - 6.55 * \log(h_b), \quad (3.10)$$

$$C = C(f_0) = 2 * \left[\log\left(\frac{f_0}{28}\right) \right]^2 + 5.4 , \quad (3.11)$$

$$D = D(f_0) = 4.78 * [\log(f_0)]^2 - 19.33 * \log(f_0) + 40.94 \quad (3.12)$$

где

$$a(h_m) = [1.1 * \log(f_0) - 0.7] h_m - [1.56 * \log(f_0) - 0.8], \quad (3.13)$$

для средних и малых городов;

$$a(h_m) = 3.2 * [\log(11.75 * h_m)]^2 - 4.97 \quad (3.14)$$

для крупных городов.

Эта модель Оокура и Хата возникла в результате адаптации эмпирических формул Хата к графикам, составленным Оокура и его соавторами.

Данными формулами можно пользоваться, если выполняются следующие условия:

- f_0 : от 150 до 1500 МГц;
- h_b : от 30 до 200 м; возможно расширение диапазона (от 1,5 до 400 м);
- h_m : от 1 до 10 м;
- r : от 1 до 20 км; возможно расширение диапазона (от 2м до 80 км).

Могенсен с соавторами предложил расширить модели Оокура и Хата на частотный диапазон от 1,5 до 2 ГГц. В этом диапазоне использование модели Оокура и Хата приводит к недооценке затухания сигнала. Модель COST231-Хата справедлива для несущих частот в диапазоне от 1,5 до 2 ГГц, высоте антенны базовой станции от 30 до 200 м, высоте антенны подвижной станции от 1 до 10 м и расстоянию между ними от 1 до 20 км. Модель позволяет оценивать затухание по формуле

$$L_p = 46,3 + 33,9 \lg(f_0) - 13,83 \lg(h_b) - a(h_m) + [44,9 - 6,55 \lg(h_b)] \lg r + C , \quad (3.15)$$

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

Формально модели Оокура и Хата и COST231-Хата можно использовать только для высоты антенны базовой станции, превышающей 30м, однако их применение возможно и для более низких высот при условии, что соседние строения значительно ниже антенны.

3.2 Исследование величины потерь, зависящих от высоты подвеса антенны принимающей станции

Используя (3.14) для высот подвеса антенны принимающего устройства определим $a(h_m)$ – см. таблицу 3.2, на основании которой строим график зависимости потерь от высоты подвеса антенны принимающей станции (см. рисунок 3.5).

Так как сети LTE используются, в основном, для передачи данных при построении мультисервисных сетей, принимающие радиосигнал устройства,

как правило, располагаются на значительной высоте; крыше здания, стенах и т.п. Поэтому важно оценить, как такое расположение повлияет на величину зоны покрытия.

Таблица 3.2 – Зависимость потерь от высоты подвеса антенны принимающего устройства

h(m)	$\log(11,75 \cdot h(m))$	$[\log(11,75 \cdot h(m))]^2$	a(h(m))
1,5	1,246129126	1,552837798	-0,26908
2,5	1,467977875	2,154959042	-2,19587
3,5	1,614105911	2,605337892	-3,63708
4,5	1,72325038	2,969591873	-4,80269
5,5	1,810400556	3,277550174	-5,78816
6,5	1,882951223	3,545505309	-6,64562
7,5	1,94509913	3,783410626	-7,40691
8,5	1,999456792	3,997827464	-8,09305
9,5	2,047761472	4,193327046	-8,71865
10,5	2,091227166	4,373231058	-9,29434
11,5	2,130735707	4,540034653	-9,82811
12,5	2,16694788	4,695663113	-10,3261
13,5	2,200371635	4,841635333	-10,7932
14,5	2,231405869	4,979172152	-11,2334
15,5	2,260369565	5,109270569	-11,6497
16,5	2,287521811	5,232756035	-12,0448
17,5	2,313075915	5,35032019	-12,421
18,5	2,337209595	5,462548691	-12,7802
19,5	2,360072478	5,569942101	-13,1238
20,5	2,381791728	5,672931834	-13,4534

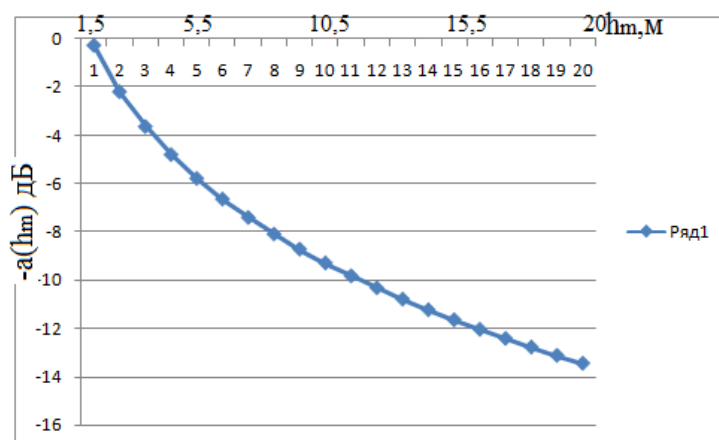


Рисунок 3.5 – График зависимости потерь от высоты подвеса антенны принимающей станции

3.3 Исследование величины потерь при различных высотах подвеса антенны базовой станции и различных высотах антенны принимающего устройства

По (3.15) определим зависимость потерь от высоты подвеса антенны БС для выборочных высот подвеса антенны принимающей станции (см. Приложение).

Расчет потерь для высоты подвеса антенны БС $h_b=50$ м.

Таблица 3.2 – Зависимость потерь при $h_b=50$ м

Lp, hb=50 м					
136,2258	132,8578	129,8492	127,2005	124,8452	123,0415
142,9084	139,5404	136,5319	133,8832	131,5278	129,7241
147,6499	144,2819	141,2733	138,6246	136,2693	134,4656
151,3276	147,9596	144,9511	142,3023	139,947	138,1433
154,3325	150,9645	147,956	145,3073	142,9519	141,1482
156,8732	153,5052	150,4966	147,8479	145,4925	143,6888
159,074	155,706	152,6974	150,0487	147,6933	145,8896
161,0152	157,6472	154,6387	151,9899	149,6346	147,8309
162,7517	159,3837	156,3752	153,7264	151,3711	149,5674
164,3225	160,9545	157,946	155,2973	152,9419	151,1382
165,7566	162,3886	159,3801	156,7314	154,376	152,5723
167,0758	163,7078	160,6993	158,0506	155,6952	153,8915
168,2973	164,9293	161,9207	159,272	156,9166	155,1129
169,4344	166,0664	163,0578	160,4091	158,0537	156,25
170,498	167,13	164,1215	161,4728	159,1174	157,3137
171,4972	168,1292	165,1207	162,472	160,1166	158,3129
172,4393	169,0713	166,0627	163,414	161,0587	159,255
173,3304	169,9624	166,9539	164,3051	161,9498	160,1461
174,1758	170,8078	167,7992	165,1505	162,7952	160,9915
174,9799	171,6119	168,6034	165,9547	163,5993	161,7956
hm=1,5	hm=3,5	hm=6,5	hm=10,5	hm=15,5	hm=20,5

График зависимости потерь при $h_b=50$ м (см. рисунок 3.6)

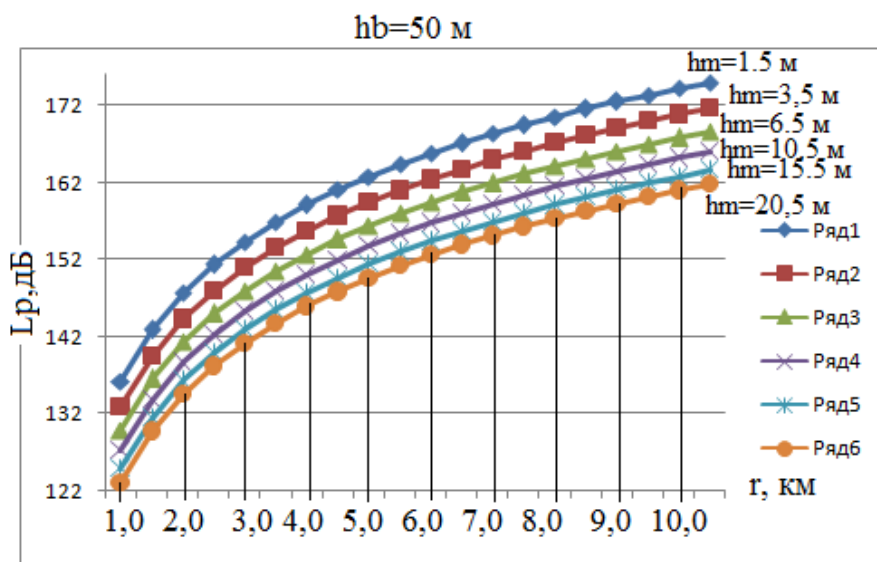


Рисунок 3.6 – График зависимости потерь при $h_b=50$ м

Расчет потерь при высоте подвеса антенны БС $h_b=40$ м.

Таблица 3.3 – Зависимость при высоте подвеса антенны БС $h_b=40$ м

$L_p, h_b=40$ м					
137,5661	134,1981	131,1896	128,5409	126,1855	124,3818
144,2488	140,8808	137,8723	135,2235	132,8682	131,0645
148,9902	145,6222	142,6137	139,965	137,6096	135,8059
152,668	149,3	146,2914	143,6427	141,2873	139,4836
155,6729	152,3049	149,2964	146,6476	144,2923	142,4886
158,2135	154,8455	151,837	149,1883	146,8329	145,0292
160,4143	157,0463	154,0378	151,3891	149,0337	147,23
162,3556	158,9876	155,979	153,3303	150,9749	149,1712
164,0921	160,7241	157,7155	155,0668	152,7114	150,9077
165,6629	162,2949	159,2864	156,6377	154,2823	152,4786
167,097	163,729	160,7204	158,0717	155,7164	153,9127
168,4162	165,0482	162,0397	159,3909	157,0356	155,2319
169,6376	166,2696	163,2611	160,6124	158,257	156,4533
170,7747	167,4067	164,3982	161,7495	159,3941	157,5904
171,8384	168,4704	165,4619	162,8132	160,4578	158,6541
172,8376	169,4696	166,4611	163,8123	161,457	159,6533
173,7796	170,4116	167,4031	164,7544	162,399	160,5953
174,6708	171,3028	168,2942	165,6455	163,2901	161,4864
175,5161	172,1481	169,1396	166,4909	164,1355	162,3318
176,3203	172,9523	169,9437	167,295	164,9397	163,136
$h_m=1,5$	$h_m=3,5$	$h_m=6,5$	$h_m=10,5$	$h_m=15,5$	$h_m=20,5$

Графики зависимости потерь от высоты подвеса антенны приемного устройства при высоте подвеса антенны БС $h_b=40$ м (см. рисунок 3.7).

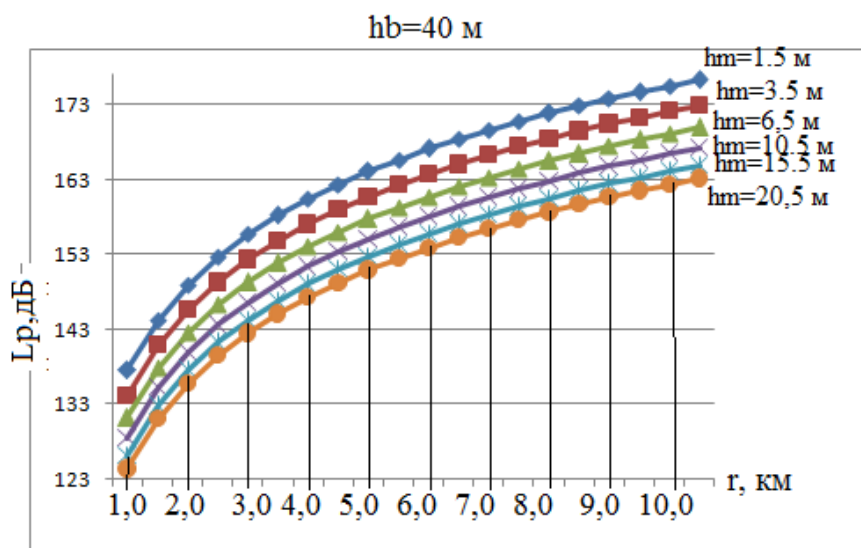


Рисунок 3.7 – График зависимости потерь при $h_b=40$ м

Расчет потерь при высоте подвеса антенны БС $h_b=30$ м.

Таблица 3.4 – Зависимость при высоте подвеса антенны БС $h_b=30$ м

Lp, $h_b=30$ м					
139,2942	135,9262	132,9176	130,2689	127,9136	126,1099
145,9768	142,6088	139,6003	136,9516	134,5962	132,7925
150,7183	147,3503	144,3417	141,693	139,3376	137,5339
154,396	151,028	148,0195	145,3707	143,0154	141,2117
157,4009	154,0329	151,0244	148,3757	146,0203	144,2166
159,9416	156,5736	153,565	150,9163	148,5609	146,7572
162,1424	158,7744	155,7658	153,1171	150,7617	148,958
164,0836	160,7156	157,707	155,0583	152,703	150,8993
165,8201	162,4521	159,4435	156,7948	154,4395	152,6358
167,3909	164,0229	161,0144	158,3657	156,0103	154,2066
168,825	165,457	162,4485	159,7998	157,4444	155,6407
170,1442	166,7762	163,7677	161,119	158,7636	156,9599
171,3656	167,9976	164,9891	162,3404	159,985	158,1813
172,5027	169,1347	166,1262	163,4775	161,1221	159,3184
173,5664	170,1984	167,1899	164,5412	162,1858	160,3821
174,5656	171,1976	168,1891	165,5404	163,185	161,3813
175,5077	172,1397	169,1311	166,4824	164,1271	162,3234
176,3988	173,0308	170,0222	167,3735	165,0182	163,2145
177,2442	173,8762	170,8676	168,2189	165,8636	164,0599
178,0483	174,6803	171,6718	169,023	166,6677	164,864
hm=1,5	hm=3,5	hm=6,5	hm=10,5	hm=15,5	hm=20,5

Графики зависимости потерь от высоты подвеса антенны приемного устройства при высоте подвеса антенны БС $h_b=30$ м (см. рисунок 3.8).

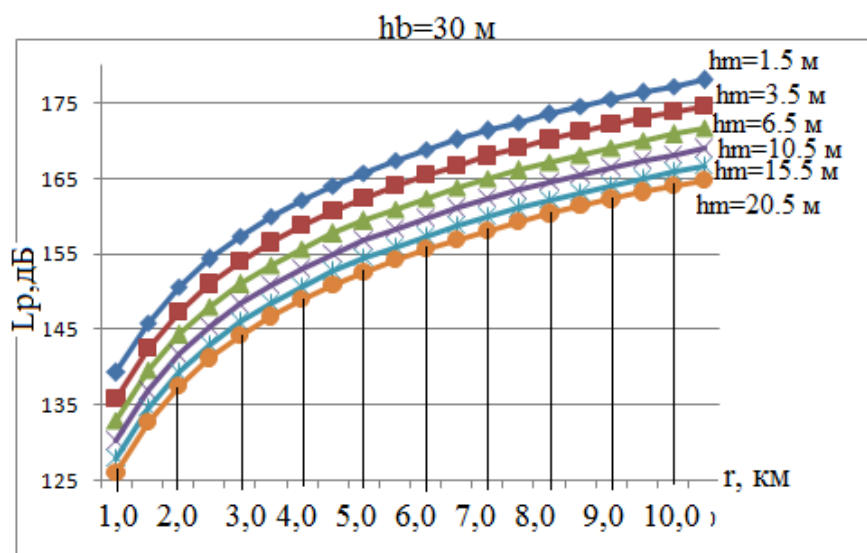


Рисунок 3.8 – График зависимости потерь при $h_b=30$ м

Расчеты и графики потерь для $h_b=15$ м приведены в приложении И.

3.4 Исследование уровня мощности радиосигнала при различных высотах подвеса антенны базовой станции и различных высотах антенны принимающего устройства

На основании данных подраздела 3.3 определим по (3.2) значение мощности радиосигнала на различных расстояниях от БС (см. рисунки 3.9 – 3.12). Также по полученным графикам можно определить расстояние между БС и принимающей станцией, выбрав в качестве уровня, достаточного для уверенного приема радиосигнала уровень $P=-10$ дБм. При этом, расстояние между БС и принимающей станцией можно определить в зависимости от высоты подвеса принимающей станции.

Анализ показывает, что дальность связи небольшая и колеблется от 1,5 до 3,5 км, что соответствует примерам, приведенным в [22].

В [22] также рассматривается возможность установки антенн различных стандартов (GSM1800 и LTE) в одном месте; на одной крыше, одной опоре и т.п. Это позволяет экономить и место и средства.

Стандарт LTE допускает возможность развертывания сегмента LTE в уже существующих диапазонах систем сотовой связи стандарта GSM.

«Гибкая» полоса LTE дает возможность производить реформирование спектра довольно просто, так как полоса начинается с 1.4 МГц или 3 МГц, а затем она может увеличиваться, при постепенном развитии сети LTE, и, соответственно, уменьшении трафика сети GSM на которую LTE накладывается.

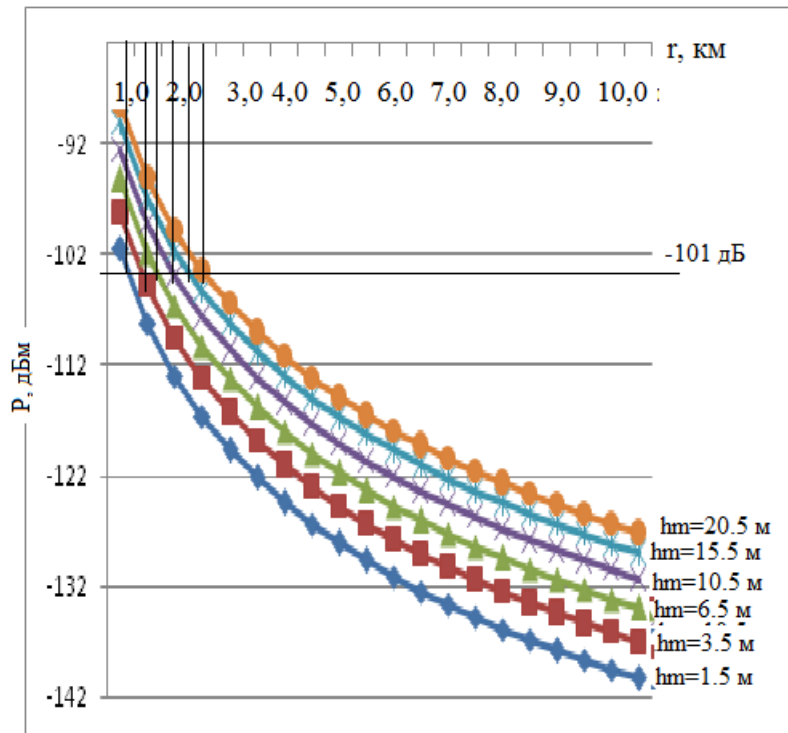


Рисунок 3.9 – График мощности радиосигнала при $h_b=30$ м

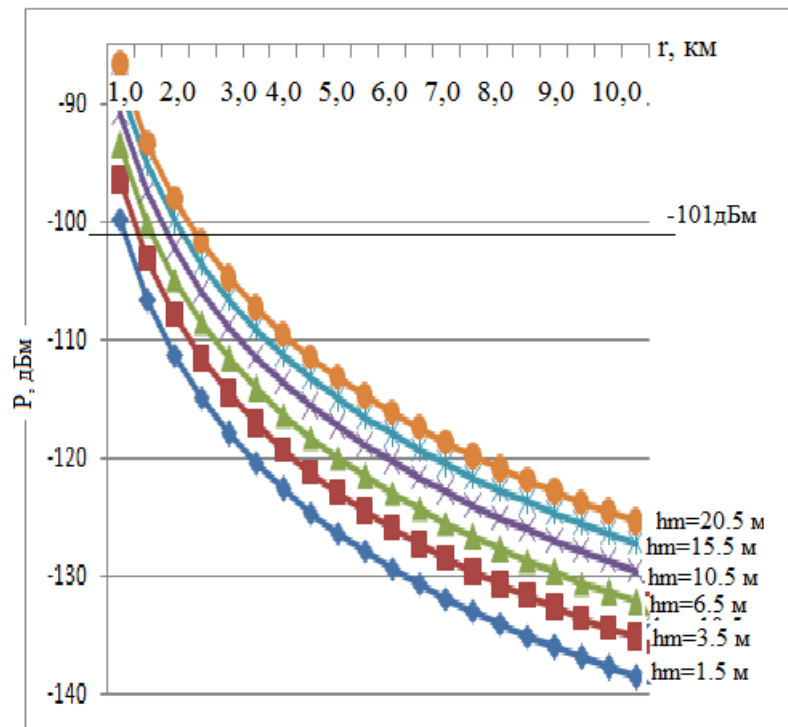


Рисунок 3.10 – График мощности радиосигнала при $h_b=40$ м

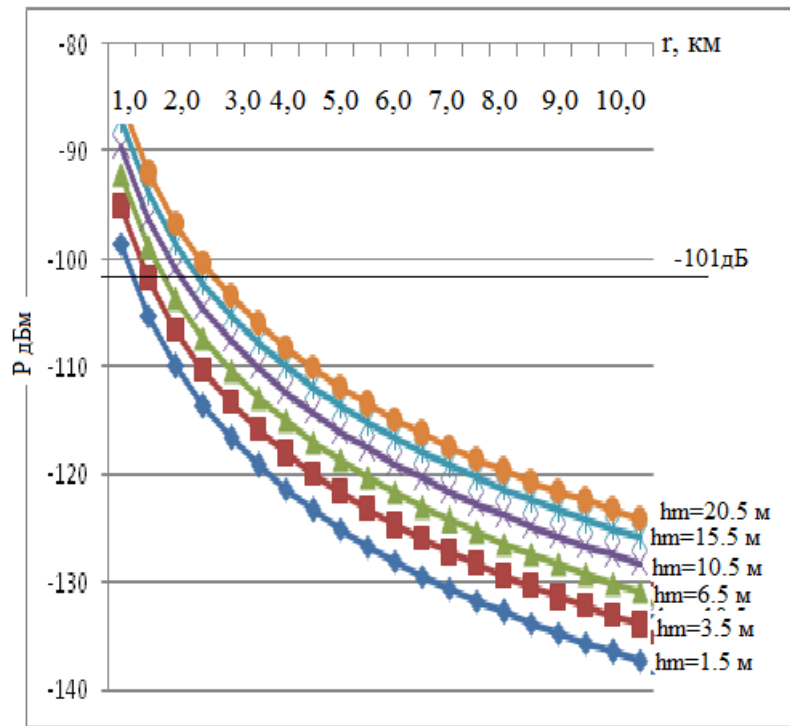


Рисунок 3.11 – График мощности радиосигнала при $h_b=50$ м

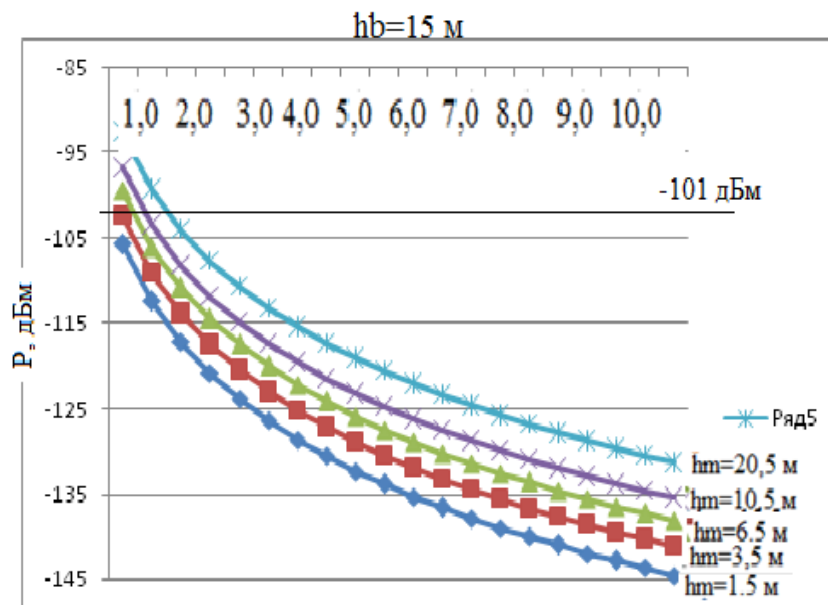


Рисунок 3.12 – График мощности радиосигнала при $h_b=15$ м

Закономерно уменьшение дальности связи с уменьшением высоты подвеса антенны БС и антенны принимающего устройства.

3.5 Анализ сравнения результатов расчета дальности связи с результатами моделирования зоны покрытия

В ходе исследования был проведен анализ и моделирование сети LTE в городе Алматы. Моделирование сети проводилось с использованием моделирующей программы Atoll. Atoll – это гибкая и масштабируемая платформа для планирования сетей сотовой связи [25].

Программное обеспечение Atoll используется для планирования радио сети, которое дает возможность планировать сети GSM/GPRS/EDGE, UMTS, LTE и другие. Atoll является открытой платформой и может быть легко интегрирован с другими системами и базами данными, уже работающими на предприятии. Это позволит исключить конфликты данных в процессе интеграции и увеличить производительность работы.

Сюда относится также моделирование условий распространения, использование трехмерных картографических данных, моделирование совместного действия различных сотовых сетей и т.д.

Расчет покрытия в LTE на примере одного сайта (см. рисунок 3.13). Параметр используемый при планировании радиосети для оценки уровня радиосигнала в LTE называется RSRP. RSRP-Reference Signal Received Power. В правом углу в окне указан промежуток уровней сигнала, полученных при моделировании. Расчет был произведен на 3D карте.

Расчет в Urban area (город-плотная застройка). Азимуты 0/120/240. Высота подвеса антенн 32м/30,5м/30,5м, соответственно 1-ый сектор/2-й сектор/3-й сектор.

Электрический наклон (electrical tilt) – 4 на всех секторных антеннах.

Углы механического наклона 2/0/0.

Также в окне указаны уровни RSRP.

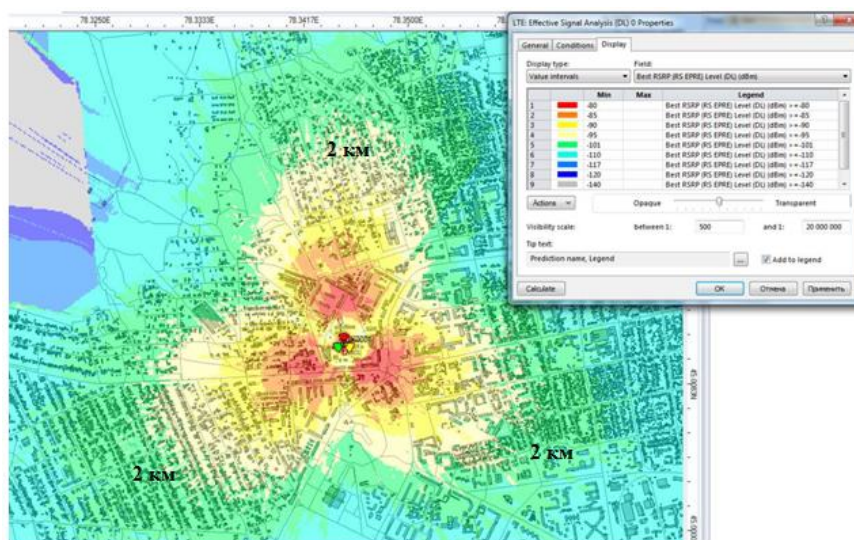


Рисунок 3.13 – Распределение уровня радиосигнала, полученное в результате моделирования, при электрическом тилте 4°

А теперь рассмотрим расчет на примере того же сайта но уже с электрическим тилтом 8 градусов. Так как сайт расположен в местности с плотной застройкой многоэтажных зданий и для уменьшения интерференции были сконфигурированы углы наклона большей величины (см. рисунок 3.14).

Как видно из расчета покрытие уменьшилось но уровень сигнала(до -101 dBm) допустимого для indoor пользования LTE сконцентрировался в радиусе 1200 – 1500 метров.

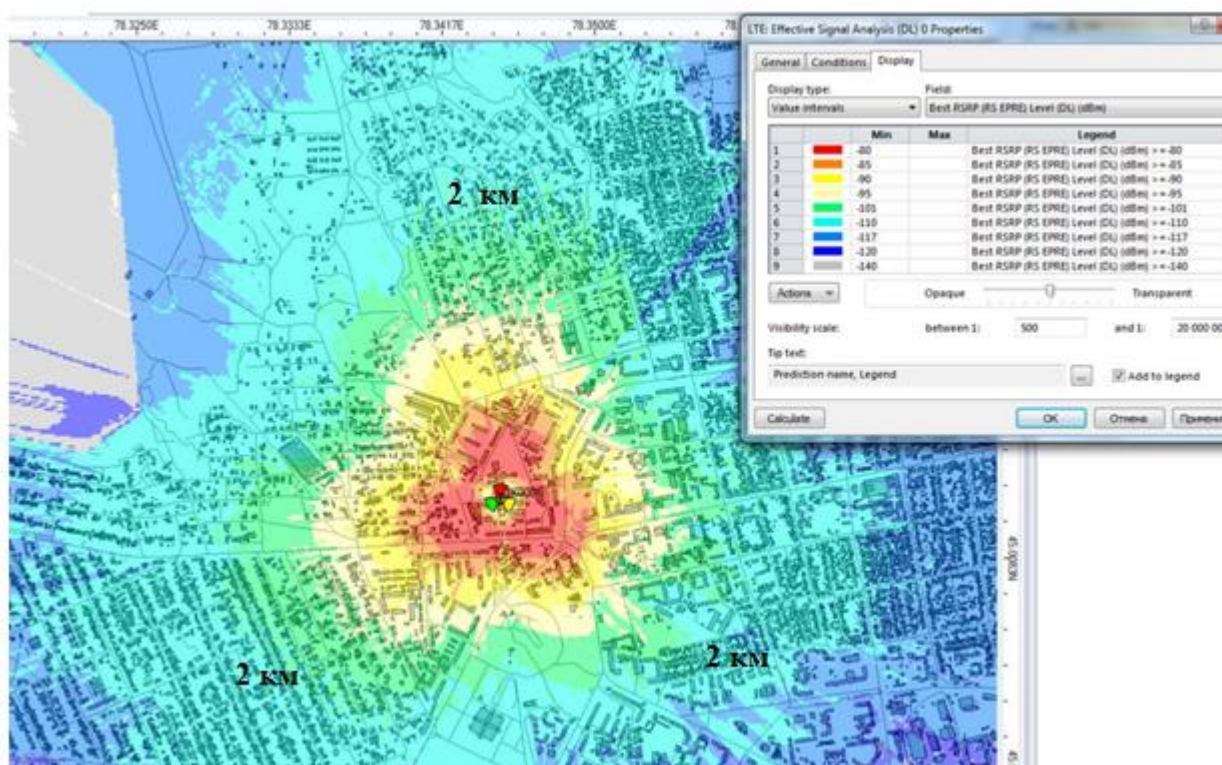


Рисунок 3.14 – Распределение уровня радиосигнала, полученное в результате моделирования, при электрическом тилте 8°

Результаты моделирования совпали с результатами расчета: расчет 1,6–2,1 км;

моделирование 1,5 – 2,4 км.

$$\text{Относительная погрешность } \sigma = \frac{0,1}{1,85} 100 = 5,4\%.$$

3.6 Расчет пропускной способности сети. Расчет количества потенциальных абонентов

Пропускную способность, или емкость, сети оценивают, базируясь на средних значениях спектральной эффективности соты в определенных условиях.

Спектральная эффективность систем мобильной связи представляет собой показатель, вычисляемый как отношение скорости передачи данных на 1 Гц используемой полосы частот (бит/с/Гц). Спектральная эффективность является показателем эффективности использования частотного ресурса, а также характеризует скорость передачи информации в заданной полосе частот.

Средняя спектральная эффективность для сети LTE, ширина полосы частот которой равна 20 МГц (10 Up, 10 Down), для частотного типа дуплекса FDD на основании 3GPP Release 9 для разных конфигураций MIMO, представлена в таблице 3.5.

Т а б л и ц а 3.5 - Средняя спектральная эффективность для сети LTE

Линия	Схема MIMO	Средняя спектральная эффективность (бит/с/Гц)
UL	1×2	1,254
	1×4	1,829
DL	2×2	2,93
	4×2	3,43
	4×4	4,48

Для системы FDD средняя пропускная способность 1 сектора eNB может быть получена путем прямого умножения ширины канала на спектральную эффективность канала:

$$R = S \cdot W, \quad (3.15)$$

где S – средняя спектральная эффективность (бит/с/Гц);

W – ширина канала (МГц); $W = 10$ МГц.

Для линии DL:

$$R_{DL} = 2,93 \cdot 10 = 29,3 \text{ Мбит/с.}$$

Для линии UL:

$$R_{UL} = 1,254 \cdot 10 = 12,54 \text{ Мбит/с.}$$

Средняя пропускная способность базовой станции R_{eNB} вычисляется путем умножения пропускной способности одного сектора на количество секторов базовой станции; число секторов eNB примем равное 3, тогда:

$$R_{eNB} = R_{DL/UL} \cdot 3 \quad (3.16)$$

Для линии DL:

$$R_{eNB,DL} = 29,3 \cdot 3 = 87,9 \text{ Мбит/с.}$$

Для линии UL:

$$R_{eNB,UL} = 12,54 \cdot 3 = 37,64 \text{ Мбит/с.}$$

Следующим этапом будет определение количества сот в планируемой сети LTE.

Для расчета числа сот в сети необходимо определить общее число каналов, выделяемых для развертывания проектируемой сети LTE. Общее число каналов N_k рассчитывается по формуле [27]:

$$N_k = \left[\frac{\Delta f_{\Sigma}}{\Delta f_k} \right] \quad (3.17)$$

где Δf_{Σ} - полоса частот, выделенная для работы сети и равная 75 МГц;
 Δf_k – полоса частот одного радиоканала; под радиоканалом в сетях LTE определяется такое понятие как ресурсный блок РБ, который имеет ширину 210 кГц, $\Delta f_k = 210$ кГц.

$$N_k = \frac{75000}{210} \approx 357 \text{ (каналов)}$$

Далее определим число каналов $N_{\text{к.сек}}$, которое необходимо использовать для обслуживания абонентов в одном секторе одной соты:

$$N_{\text{к.сек}} = \left[\frac{N_k}{(N_{\text{кл}} \cdot M_{\text{сек}})} \right], \quad (3.18)$$

где N_k – общее число каналов;
 $N_{\text{кл}}$ – размерность кластера, выбираемое с учетом количества секторов eNB, примем равным 3;
 $M_{\text{сек}}$ – количество секторов eNB, принятое 3.

$$N_{\text{к.сек}} = \left[\frac{357}{(3 \cdot 3)} \right] \approx 39 \text{ (каналов)}$$

Далее определим число каналов трафика в одном секторе одной соты $N_{\text{кт.сек}}$. Число каналов трафика рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{кт.сек}} = N_{\text{кт1}} \cdot N_{\text{к.сек}}, \quad (3.19)$$

где $N_{\text{кт1}}$ – число каналов трафика в одном радиоканале, определяемое стандартом радиодоступа (для OFDMA $N_{\text{кт1}} = 1...3$); для сети LTE выберем $N_{\text{кт1}} = 2$.

$$N_{\text{кт.сек}} = 2 \cdot 39 \approx 78 \text{ (каналов)}.$$

В соответствии с моделью Эрланга, представленной в виде графика на рисунке 3.15, определим допустимую нагрузку в секторе одной соты $A_{\text{сек}}$ при допустимом значении вероятности блокировки равной 1% и рассчитанным выше значением $N_{\text{кт.сек}}$. Определим, что $A_{\text{сек}} = 65$ Эрл.

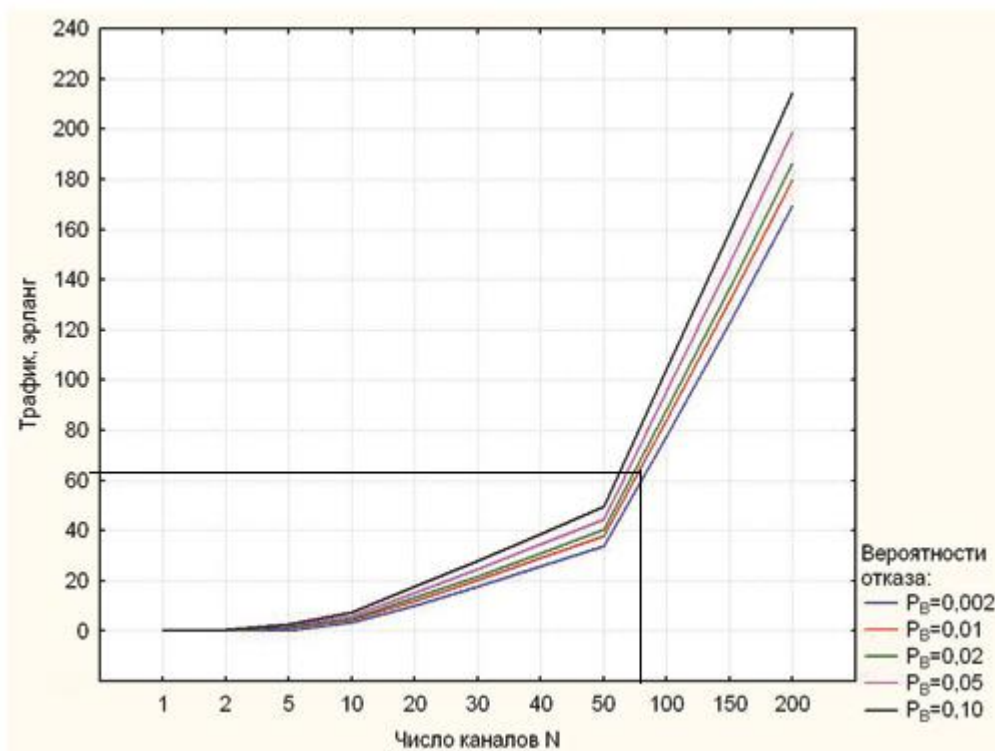


Рисунок 3.15 – Зависимость допустимой нагрузки в секторе от числа каналов трафика и вероятности блокировки

Число абонентов, которое будет обслуживаться одной eNB, определяется по формуле:

$$N_{аб.eNB} = M_{сек.} \cdot \left[\frac{A_{сек.}}{A_1} \right], \quad (3.20)$$

где A_1 – средняя по всем видам трафика абонентская нагрузка от одного абонента; значение A_1 может составлять (0,04...0,2) Эрл – голосовой трафик. Так как проектируемая сеть планируется использоваться для высокоскоростного обмена информацией, то значение A_1 примем равным 0,2 Эрл. Таким образом:

$$N_{аб.eNB} = 3 \cdot \left[\frac{65}{0,2} \right] \approx 975 \text{ (абонентов).}$$

Число базовых станций eNB в проектируемой сети LTE найдем по формуле:

$$N_{eNB} = \left[\frac{N_{аб.}}{N_{аб.eNB}} \right] + 1 \quad (3.21)$$

где $N_{аб.}$ – количество потенциальных абонентов.

Пусть основные абоненты, пользующиеся технологией LTE, составят 20% от населения. Общее число жителей в г. Алматы составляет 1450,3 тыс. человек [26]. Таким образом, количество потенциальных абонентов составит 290600 человек, тогда:

$$N_{eNB} = \left[\frac{290600}{975} \right] + 1 \approx 299 \text{ (eNB).}$$

Среднюю планируемую пропускную способность R_N проектируемой сети определим путем умножения количества eNB на среднюю пропускную способность eNB. Формула примет вид:

$$R_N = (R_{eNB.DL} + R_{eNB.UL}) \cdot N_{eNB}, \quad (3.22)$$

$$R_N = (87,9 + 37,64) \cdot 299 \approx 37536,46 \text{ (Мбит/с)}.$$

Далее дадим проверочную оценку емкости проектируемой сети и сравним с рассчитанной. Определим усредненный трафик одного абонента в ЧНН:

$$R_{Т.ЧНН} = \frac{T_m \cdot q}{N_{ЧНН} \cdot N_d} \quad (3.23)$$

где T_m - средний трафик одного абонента в месяц, $T_m = 30$ Гбайт/мес;

q – коэффициент для городской местности, $q = 3$;

$N_{ЧНН}$ – число ЧНН в день, $N_{ЧНН} = 7$;

N_d – число дней в месяце, $N_d = 30$.

$$R_{Т.ЧНН} = \frac{30 \cdot 3}{7 \cdot 30} = 0,42 \text{ (Мбит/с)}$$

Определим общий трафик проектируемой сети в ЧНН $R_{общ./ЧНН}$ по формуле:

$$R_{общ./ЧНН} = R_{Т.ЧНН} \cdot N_{акт.аб}, \quad (3.24)$$

где $N_{акт.аб}$ – число активных абонентов в сети; определим число активных абонентов в сети как 30% от общего числа потенциальных абонентов $N_{аб}$, то есть $N_{акт.аб} = 87180$ абонентов.

$$R_{общ./ЧНН} = 0,42 \cdot 87180 = 36615,6 \text{ (Мбит/с)}.$$

Таким образом, $R_N > R_{общ./ЧНН}$. Это условие показывает, что проектируемая сеть не будет подвергаться перегрузкам в ЧНН.

В Алматы сеть связи LTE компании Altel Kazakhstan запустила 355 сайтов (БС) – легальная информация [15]. Имеются и другие операторы, предоставляющие услуги LTE, но количество запущенных сайтов не публикуется.

Т.к. сети LTE становятся все более востребованными для передачи данных и мультимедийных услуг, определим оптимальное количество БС, которое необходимо, чтобы сеть не подвергалась перегрузкам в ЧНН при возрастающем числе потенциальных абонентов.

Расчет производился при условии, что число потенциальных абонентов составляет 50% от всего населения, трафик смешанный; т.е. часть абонентов пользуется голосовыми вызовами, другая – мультимедийными услугами. Поэтому случайная величина – частота вызовов λ выз/ч изменялась от 1 до 9, средняя продолжительность обслуживания одного вызова составила 1 ч.

Определим средний трафик одного абонента $A1$ [27]:

$$A1 = \lambda \cdot T, \text{ Эрл.} \quad (3.25)$$

По (3.20) определим число абонентов, которое будет обслуживаться одной eNB, при изменяющемся количестве вызовов в ч (см. таблицу 3.6).

Таблица 3.6 – Количество абонентов, обслуживаемых одной eNB

λ выз/час	T, час	A1	Наб eNB
1	1	1	195
2	1	2	97,5
3	1	3	65
4	1	4	48,75
5	1	5	39
6	1	6	32,5
7	1	7	27,85714
8	1	8	24,375
9	1	9	21,66667

График зависимости количества обслуживаемых абонентов от частоты вызовов показан на рисунке 3.16.

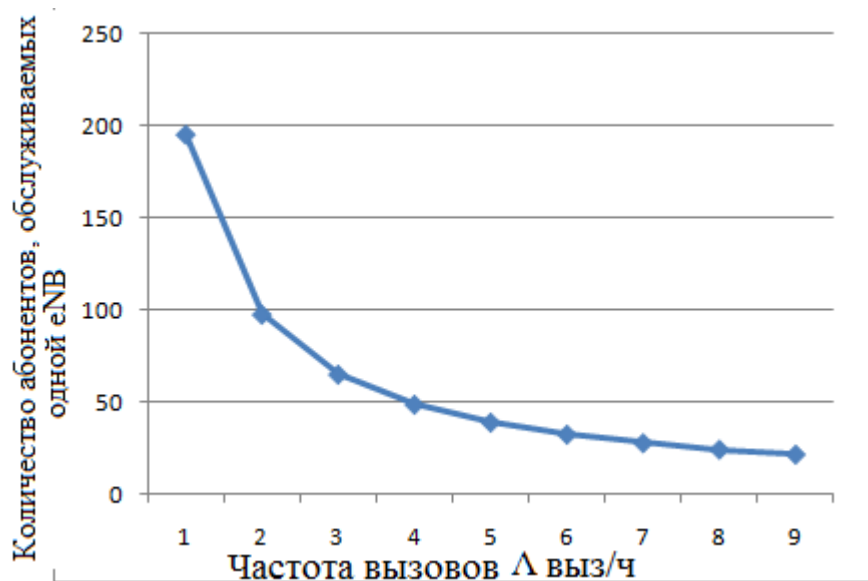


Рисунок 3.16 – График зависимости количества абонентов, обслуживаемых одной БС от частоты вызовов

Пусть основные абоненты, пользующиеся технологией LTE, составят 50% от населения, а число активных абонентов составит 50% от числа потенциальных абонентов:

$$N_{\text{акт.аб}} = 0,5 \cdot 1450300 \cdot 0,5 = 362575 \text{ аб.}$$

По (3.24) определим общий трафик проектируемой сети в ЧНН $R_{\text{общ./ЧНН}}$:

$$R_{\text{общ./чнн}} = 0,42 \cdot 362575 = 152281,5 \text{ Мбит/с.}$$

Определим среднюю планируемую пропускную способность R_N проектируемой сети по (3.22). Результаты расчета – см. таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Зависимость пропускной способности сети от количества БС

N_{eNB}	355	400	500	600	700	800	900	1000	1250
R_N	44552,5	50200	62750	75300	87850	100400	112950	125500	156875

На рисунке 3.17 показана зависимость общего трафика сети, необходимого для обслуживания 362575 активных абонентов от количества БС (пропускной способности сети). Расчет – см. Приложение Л.

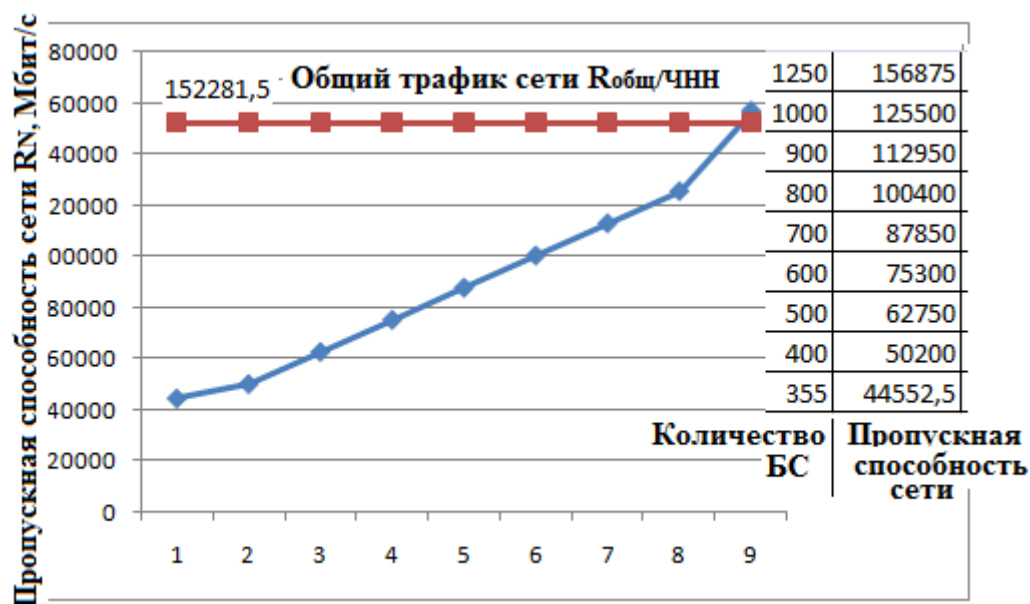


Рисунок 3.17 – Зависимость пропускной способности сети (общего трафика сети) от количества БС (пропускной способности сети)

Расчеты показали, что для удовлетворения потребностей абонентов в сетях LTE г. Алматы должно быть около 1200 БС.

3.7 Значения достигнутой скорости в сетях LTE

Заявленные в Релизе 8 скорости передачи сетей LTE Сети LTE доходят до 100 Мбит/с по линии вниз и до 50 Мбит/с по линии вверх. Полоса равна 20 МГц, в полосе 20 МГц, задержки в плоскости управления снижаются до 50-100 мс при переходе из спящего или неактивного режима в режим выделенного канала.

Абонентское оборудование, используемое в сетях LTE самое различное (см. рисунок 3.18) [28].




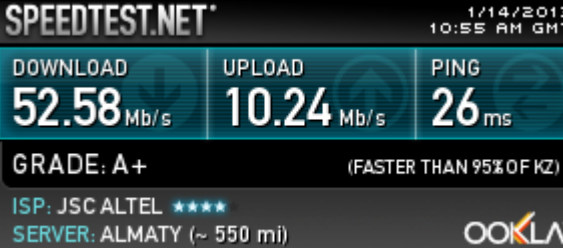
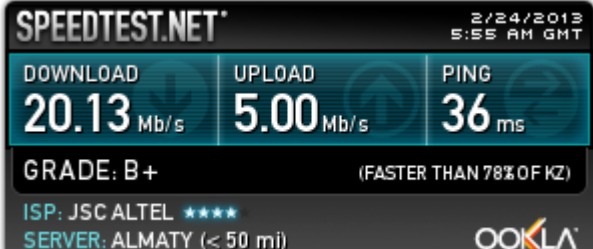


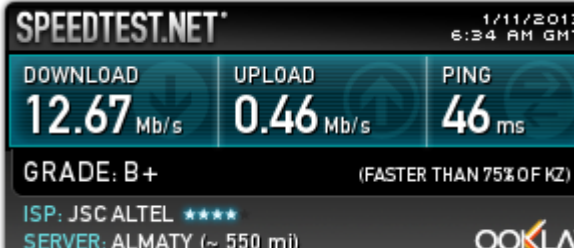
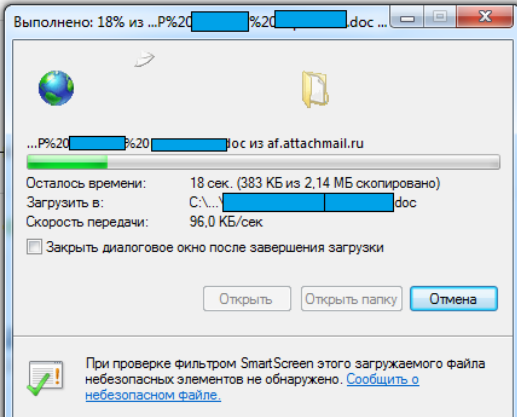
Рисунок 3.18 – Распределение абонентских устройств LTE

В настоящее время основная масса абонентов пользуется услугами сетей 3G, в которых MegaLine Turbo или MegaLine Hit обеспечивает не самые высокие скорости. Это отражается на качестве получаемых услуг: «виснет» Интернет при скачивании видеoinформации, или время скачивания оказывается значительным. Пользование сетями LTE обещает гораздо более высокую скорость, в десятки или сотни раз.

Как правило, скорость, заявленная разработчиками новой технологии или производителями оборудования, никогда не обеспечивается в реальных условиях функционирования сети связи. Тестирование сети при ее запуске, хотя и приближено к реальным условиям, все-таки отличается от условий каждодневного функционирования: к сети подключаются новые абоненты, создаются новые сети, функционирование которых изменяет условия работы: создает дополнительные помехи и т.п.

В таблице 3.8 показаны результаты тестирования скорости в сетях LTE в г. Алматы и п. Ажар. В таблице представлены результаты тестирования в трех районах, причем в местах, расположенных недалеко друг от друга [29]. Для сравнения приводится скорость получения информации с помощью MegaLine Hit.

Таблица 3.8 – Тестирование скорости в сетях LTE в различных районах г. Алматы

Алматы, район Атакента	Возле Рамстор Галерея
	
п. Акжар ул.Бекешева-Аккент (15я линия)	п.Акжар (Даулеткерей-Абая)
	
Простпект Сейфуллина уг. ул Котельникова	ЖД Вокзал Алматы-1, зал ожидания
	<p style="text-align: center;">0</p> 
Акан-Сері Котельникова (3G) 20 – 120 кбит/с в разное время суток	
	

Из таблицы видно, скорость передачи данных по линии вниз в Турксибском районе возросла в 130 – 500 раз.

Заключение

В процессе анализа эффективности внедрения сетей LTE в г. Алматы были решены следующие задачи:

- выполнен обзор технологии LTE, признаков, отличающих данную технологию от других технологий широкополосного доступа;
- рассмотрены основные принципы, используемых при построении сетей на основе LTE;
- описано оборудование, примененное при построении сетей LTE в г. Алматы;

При анализе подхода к оценке распространения радиосигнала в сети LTE были учтены факторы распространения радиосигнала в условиях сильно пересеченной местности (рельефа) и разной плотности городской застройки.

При расчете потерь учитывалась различная высота подвеса антенн принимающего устройства, что характерно для мультисервисных сетей, использующих беспроводные технологии. При расчете потерь учитывалась также разная высота подвеса антенны БС.

Расчет уровня радиосигнала в точке приема производился также для разных высот подвеса антенн БС и принимающего устройства. Полученные графики могут использоваться для практического применения при оперативной оценке уровня сигнала на разных расстояниях от БС.

Результаты расчета сравнивались с результатами моделирования распространения радиосигнала, выполненного с помощью программного обеспечения Atoll. Относительная погрешность составила 5,4%.

При оценке емкости сети связи было определено, сколько потенциально необходимо иметь БС различных операторов для того, чтобы удовлетворить потребности абонентов в таких услугах, как мультимедиа и передача данных с высокой скоростью. Получены графики зависимости количества абонентов, обслуживаемых одной БС от частоты вызовов и графики зависимости пропускной способности сети (общего трафика сети) от количества БС (пропускной способности сети). В литературных источниках до сих пор приводятся примеры расчетов емкости сети (в том числе и для LTE) для голосового трафика.

Анализ тестов скорости, достигнутой в сетях LTE в различных районах г. Алматы показал, что по сравнению с сетями 3G скорости возросли в 130 – 500 раз.

Это говорит об определенной эффективности от внедрения сетей LTE, а также показывает, что для более полного удовлетворения потребностей абонентов развитие сетей необходимо продолжить.

Список литературы

- 1 <http://corp.alser.kz/news-item/342>
 - 2 <http://ct.kz/topic/465239-4g-lte-v-kazahstane-ot-altel/>
 - 3 Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010.
 - 4 Тихвинский В.О., Терентьев С.В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS. – М.: Эко-Трендз, 2007.
 - 5 3GPP TR 25.913 Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN), Release 7, V7.3.0, 2006.
 - 6 3GPP TS 36.300 – v8.0.0, E-UTRA and E-UTRAN Overall Description.
 - 7 Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Минаев И.В. Стандартизация, спецификации, эволюция технологии и архитектура базовой сети LTE // Сети и средства связи, № 2(10). Специальный выпуск «Сети доступа». – 2009. - № 3, – С.34 – 39.
 - 8 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 1(98) П.А. Новиков. ОРГАНИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ ДЛЯ ЭМУЛЯЦИИ СЕТИ LTE .
 9. Fritze, M.Sc. SAE – The Core Network for LTE. // Ericsson Austria GmbH. 2008.
 10. Beming, P. LTE-SAE architecture and performance / P. Beming, L. Frid // Ericsson, 2007.
 11. Дальман, Э. Радио-интерфейс LTE в деталях / Э. Дальман, А.Фурускар, И. Ядинг. – М.: Сети и Системы связи, 2008.
 - 12 Аналитический обзор ericsson 284 23-3153 Uen | апрель 2011г.
 - 13 Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.
 - 14 Слюсар В. Системы MIMO. Принципы построения и обработка сигналов. Электроника: Наука, Технология, Бизнес 8/2005
 - 15 <http://support.zte.com.cn> FDD LTE Network Low Level Design for Altel Kazakhstan.
 - 16 <http://femtosota.blogspot.com/p/gsmumts4g.html>
- Конструктивные особенности антенн для базовых станций сетей GSM/UMTS/4G.**
- 17 Ericsson Radio Systems AB, Cell Planning principles, Course Documentation EN/LZT 123 3314 R3A, 1998
 - 18 Ефанов В.И., Береснев А.В. Анализ зон обслуживания сотовой системой подвижной радиосвязи в г. Томске // Тезисы докл. Регионально научно-технической конф. судент. и молодых ученых. Часть 2. - Томск: ТУСУР. -1999.;- С. 15-17.

19 Береснев А.В. Проведение натуральных измерений напряжённости поля в сотовых системах подвижной радиосвязи // Цифровые радиоэлектронные системы, 2001, №4. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.drts.susu.ac.ru/~rvm/vol4/a12_04.zip

20 К.А. Спорышев, А.М. Ткачев, А.С. Постольный. Анализ подходов к оценке прогнозируемых зон обслуживания базовыми станциями в системах подвижной радиосвязи. Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков, 2008 г.

21 Ликонцев Д.Н. Специальные вопросы курса распространение радиоволн. Ташкент - 2008

22 Бабков В.Ю. Общие подходы к задачам планирования и оптимизации 2G - 4G сетей подвижной связи. Санкт-Петербург 2011 г.

23 Б. Б. Агатаева, Л. И. Сарженко. Мобильные телекоммуникации и цифровые системы передачи. Конспект лекций – Алматы: АУЭС, 2013. – 60 с.

24 Б. Б. Агатаева, Л. И. Сарженко. Мобильные телекоммуникации и цифровые системы передачи. Методические указания и задания к выполнению курсовой работы.– Алматы: АИЭС, 2010. – 18 с.

25 http://azymuth.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=17

26 <http://rus.almaty.gorstat.kz/>

27 Системы мобильной связи. Часть 1. Принципы организации, функционирования и частотного планирования систем мобильной связи: Учебное пособие по дисциплине «Системы мобильной связи» для студентов заочной формы обучения / Сост. А. В. Печаткин; РГАТА. – Рыбинск, 2008. – 122 с.

28 LTE - Стандарт 4 поколения в подвижной связи. Источник GSA. [Электронный ресурс].

29 <http://www.kcell.kz/ru/article/show/712/567>