

**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)
_____ «____» _____ 2014г.
(подпись) (дата)

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка**

на тему: Исследование характеристик радиодоступа на базе технологии LTE

Магистрант Нарымбетов А.М. _____ группа ИТСп-12-1
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель к.т.н., доцент _____ Есеркегенов А.С.
(ученая степень, звание) (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 Нарымбетову А.М.
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Исследование характеристик радиодоступа на базе технологии LTE»

утверждена Ученым советом университета № от « » 2013 г.

Срок сдачи законченной диссертации « »

Цель исследования состоит в варианте расширения сети абонентского радиодоступа на базе технологии LTE

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

1. Анализ актуальности использования сети радиодоступа
2. Принципы построения, архитектуру и функции сети
3. Информационный обзор основных технологий сети радиодоступа
4. Оценка работы радиодоступа при различных технологиях и стандартах
5. Расчет основных параметров качества радиодоступа на базе LTE и результаты расчетов

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Рисунок 1.1 - График стандартизации 3GPP LTE

Рисунок 2.1 – Общая структура системы MIMO

Рисунок 2.2 - Структурная схема MIMO канала в среде Simulink

Рисунок 3.3- Зоны покрытия каждой базовой станции

Рисунок 3.11 - График изменения максимального значения эксцесса

Рекомендуемая основная литература

1. Бабаков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
2. Вишневский В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009.
3. Гельгор А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011

Г Р А Ф И К
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1 Информационный обзор радиодоступа	05.10.2012	
2 Основные виды сетей и технологии LTE	02.02.2013	
3 Анализ основных параметров сети радиодоступа	10.03.2013	
4 Оценка работы радиодоступа LTE при различных технологиях и стандартах	05.09.2013	
5 Расчет задержек при передаче речи	03.10.2013	
6 Расчет пропускной способности системы	20.10.2013	
7 Анализ полученных экспериментальных и расчетных данных	10.12.2013	

Дата выдачи задания _____

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

Руководитель диссертации _____ (Есеркегенов А.С.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению
магистрант _____ (Нарымбетов А.М.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Андатпа

Берілген магистрлік диссертацияда радиобайланыстың кең жолақты желілерінің даму әдістері қарастырылған. Сымсыз байланыс LTE технологиясы арқылы көрсетілген. Жұмыста экспериментті зерттеулер жүргізілген және радиобайланыс жүйесі бойынша есептеу бөлімі ұсынылған. Әр түрлі технологиялар мен стандарттар негізінде LTE радиобайланысы желісі жұмысының эксперименталды зерттеулерінің нәтижелері көрсетілген.

Аннотация

В данной магистерской диссертации рассмотрены методы развития широкополосных сетей радиодоступа. Беспроводная радиосвязь представлена технологией LTE. В работе проведены экспериментальные исследования и представлена расчетная часть по системе радиодоступа. Отражены результаты экспериментальных исследований работы сети радиодоступа LTE при различных технологиях и стандартах.

Содержание

Введение.....	6
1 Основная часть.....	8
1.1 Введение в LTE.....	8
1.2 Стандартизация LTE.....	9
1.3 Архитектура.....	11
1.4 Радиотехнология OFDM.....	13
1.5 Усовершенствованные антенны.....	15
1.6 Частотные диапазоны для FDD и TDD.....	15
1.7 Ценовая эффективность.....	17
1.8 Радиодоступ.....	19
2 Экспериментальная часть.....	24
2.1 Исследование помехоустойчивости MIMO-OFDM систем.....	24
3 Расчетная часть.....	28
3.1 Расчет возможной зоны покрытия для системы.....	28
3.2 Суммарная вероятность ухудшения качества связи.....	32
3.3 Расчет качественных показателей.....	34
3.4 Расчет пропускной способности системы.....	41
3.5 Оценка требуемого числа каналов и вероятности потери вызова.....	42
3.6 Оценка погрешности по сходимости распределений.....	45
3.7 Расчет задержек при передаче речи.....	46
Заключение.....	47
Список литературы.....	48
Приложение А.....	50
Приложение Б.....	52

Введение

В наши дни, то есть во время инновационного и технологического развития прогнозируется очень стремительный подъем, рост и быстрое развитие отрасли телекоммуникаций. Следует добавить, что отрасль является растущей, высокотехнологичной и наиболее привлекательной сферой экономики государства. Это характеризуется быстрым развитием и усовершенствованием новых расширенных и разнообразных услуг, приложений, стандартов и технологий. Возможности проводной сети не являются обширными, поэтому модернизация и расширение возможностей проводной сети доступа (абонентских линий) требует колоссальных затрат и занимает довольно длительное время со стороны оператора связи. Вместе с тем доходы оператора связи не могут быть получены без построения сети абонентского доступа, которые формируются из установочной платы и оплаты за трафик.

При существующих темпах строительства номерной емкости и сетевой инфраструктуры отсрочка на протяженный срок надлежащих финансовых средств является нежелательным. Однако без сети абонентского доступа нельзя подключить новых абонентов к существующей номерной емкости, следовательно, оператор, который ждет от своей сети доходы, не может их получить.

Зарекомендовавший себя подход к решению проблемы «последней мили», такой как уплотнение абонентских линий, большей известностью пользуется решение, основанный на технологии беспроводной связи. Преимущества беспроводной связи проявляются в отсутствии или недостаточно развитой кабельной инфраструктуры в труднодоступных и отдаленных районах. Беспроводные системы в соответствии со спросом абонентов позволяют хорошо развивать и строить сеть быстрее. В результате сокращаются капитальные затраты на постройку данной сети. И что очень важно, сокращается срок ее окупаемости, а также уменьшаются значительные расходы на техническое обслуживание сетей и эксплуатацию.

В комплексе с другими методами построения сети абонентского и беспроводного доступов позволяют экономично и стремительно решать вопросы подключения по сути дела любого «неудобного», с точки зрения проводного решения, абонента.

Конечно, мнение о том, что беспроводные технологии в процессе своего развития полностью вытеснят традиционные решения, предусматривающие наличие кабельных систем является ошибочным. Как и любая система беспроводные технологии обладают рядом проблем с точным расчетом места размещения точки доступа и приемника. Поэтому на сегодняшний день, технологии беспроводной связи не могут в полном объеме обеспечить устойчивую, то есть не подверженную колебаниям работу сети.

На сегодняшний день на рынке телекоммуникации существует не малое число систем абонентского радиодоступа. В свою очередь они отличаются

друг от друга по своей архитектуре, техническим параметрам, характеристике и по типу задач, решаемых с их помощью.

По сравнению с другими нынешними подходами к решению проблемы «последней мили», к которым относится прокладка волоконно-оптических линий связи или уплотнение абонентских линий, беспроводные системы обладают большими, можно сказать современными преимуществами в местах с полным отсутствием или недостаточностью кабельной инфраструктуры, такие как труднодоступные районы, сельская местность, пригородные и отдаленные зоны. К тому же радиодоступ дает много возможностей быстрого развертывания «альтернативной» сети в районах с развитой инфраструктурой и высокой плотностью населения (абонентов). И она является независимой от кабельной распределительной сети. Кроме того, применение радиодоступа дает возможность создания сетей с ограниченной подвижностью абонентов. А себестоимость развертывания гораздо ниже по сравнению с сетями мобильной связи.

Данная магистерская диссертация в основном сосредоточена на решении задач повышения и улучшения качества сети, которые актуальны в первую очередь с практической точки зрения.

Целью данной работы является исследование качества сети радиодоступа на базе LTE путем улучшения параметров при различных технологиях и стандартах. Для достижения данной цели в работе необходимо сделать следующее:

- анализ актуальности использования радиодоступа на базе технологии LTE;
- рассмотреть принципы построения, архитектуру и функции сети;
- информационный обзор основных технологий и стандартов радиодоступа;
- провести анализ основных параметров MIMO;
- экспериментальная оценка работы радиодоступа при различных технологиях и стандартах;
- произвести расчет основных параметров качества сети радиодоступа.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. В работе рассмотрены теоретические и методологические аспекты данной темы, а также имеется расчетная часть, в которой отображены все расчеты и исследования. Как источники использованы труды отечественных и зарубежных ученых и специалистов, как Бабаков В. Ю., Вознюк М. А., Вишнеvский В. М., Трибушная В.Х., Farooq Khan, Stefania Sesia.

1 Основная часть

1.1 Введение в LTE

Мобильный широкополосный доступ становится все более распространенным, по мере того, как подрастает интернет-поколение, а вместе с ним и потребность иметь возможность широкополосного доступа везде, где бывает современный человек, а не только дома или в офисе. Из прогнозируемого числа в 1.8 млрд людей, которые к 2012 году обзаведутся широкополосным доступом, примерно две трети будут пользоваться им в мобильном варианте, причем большинство таких пользователей получают услуги мобильного ШПД благодаря сетям с поддержкой HSPA (High Speed Packet Access) и LTE (Long Term Evolution).

Все, кому это нужно, уже сегодня могут легко использовать интернет или посылать сообщения электронной почты с ноутбуков, поддерживающих технологию HSPA, постепенно заменяя фиксированные DSL-модемы беспроводными HSPA-модемами или USB-донглами, а также отправляя или получая видео или музыку с помощью телефонов 3G. Но когда появится LTE, пользоваться подобными услугами станет значительно комфортнее. Более того, в сетях LTE наверняка появятся и другие услуги из числа тех, которые весьма требовательны к пропускной способности канала связи, как, например, интерактивное ТВ, мобильный видео-блоггинг, современные онлайн-игры или профессиональные услуги.

Переход к LTE сулит несколько важных преимуществ для абонентов и операторов:

- производительность и емкость. Одно из требований, предъявляемых стандартом к системам LTE – поддерживать пиковые скорости загрузки данных из сети вплоть до 100 Мбит/с. Сама по себе технология позволяет реализовать в ее рамках еще более высокие скорости, например, более 200 Мбит/с, и компания Ericsson, например, уже продемонстрировала работу системы LTE с пиковой скоростью примерно 150 Мбит/с. Более того, время отклика на посылку короткого пакета данных в радиоподсистеме RAN (Radio Access Network) сети LTE должно быть не более 10 мс. Это означает, что LTE, более, чем любая другая технология, отвечает ключевым требованиям, предъявляемым к системам 4G;

- простота. Прежде всего, LTE способна работать в полосе частот различной ширины, начиная от значений заметно ниже 5 МГц (1.5 МГц) и вплоть до полосы 20 МГц. LTE также может быть реализована на основе различных принципов разделения сигналов, частотного и временного – FDD (Frequency Division Duplex) и TDD (Time Division Duplex). До настоящего времени, 3GPP предусмотрела для работы систем LTE десять парных и четыре непарных частотных диапазона. Планируется выделение и других диапазонов. Это означает, что оператор может первоначально запускать LTE в «новых» диапазонах, где обычно проще получить полосы в 10 МГц или даже 20 МГц, а

затем постепенно внедрять LTE во всех доступных диапазонах. Кроме того, продукты радиосистемы LTE будут обладать набором свойств, которые упростят строительство и управление сетей следующего поколения. Например, такие функции, как «включил и работай», автоконфигурация и автооптимизация упростят и снизят затраты на запуск и управление сетями. В третьих, сети LTE будут строиться в параллель с упрощенными, основанными на IP-протоколе опорными и транспортными сетями, что позволит упростить строительство, эксплуатацию систем LTE и ввод новых услуг;

- широкий выбор терминалов. Кроме мобильных телефонов, в сетях LTE будет работать много компьютеров и устройств потребительской электроники, таких, как ноутбуки, нетбуки, игровые устройства и камеры, оснащенные встроенным модулем работы с LTE-сетью. Поскольку LTE обеспечивает поддержку хендоверов и роуминга с существующими мобильными сетями, все эти устройства с первого же дня запуска смогут пользоваться преимуществами уже существующего покрытия сетей 2G/3G.

Таким образом, внедряя LTE, операторы смогут наиболее эффективным образом использовать выделенные им частоты, а также достичь стоящих перед ними бизнес-целей в области радиодоступа и мультимедийных услуг.

1.2 Стандартизация LTE

LTE – это следующий существенный шаг в развитии мобильной радиосвязи, который оформлен, как Release 8 3GPP (3rd Generation Partnership Project). LTE использует ортогональное мультиплексирование с частотным разделением (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) в качестве технологии радиодоступа, вместе с усовершенствованными антенными технологиями.

3GPP – это коллективное соглашение, основанное в декабре 1998 года, которое объединило несколько организаций в области стандартизации телекоммуникаций, известных, как «партнеры-организаторы». В настоящее время «партнерами организаторами» являются ARIB, CCSA, ETSI, ATIS, TTA и TTC. Исследователи и инженеры разработчики со всего мира, представляющие более 60 операторов, вендоров и исследовательских институтов, участвуют в совместных попытках сформулировать стандарт радиодоступа LTE. [Нельзя не отметить, что в декабре 2008 года, эти попытки увенчались успешным выпуском соответствующего стандарта].

Кроме LTE, 3GPP разработал также «плоскую» сетевую архитектуру, основанную на использовании IP. Эта архитектура определена, как часть разработок в рамках проекта System Architecture Evolution (SAE, эволюция системной архитектуры). Были разработаны архитектура и концепции LTE-SAE для эффективной поддержки массового использования любых услуг на базе интернет протокола. Архитектура основана на эволюции существующей базовой сети GSM/WCDMA в сторону упрощения операций и органичного, эффективного по затратам развертывания.

Более того, были инициировано взаимодействие между 3GPP и 3GPP2 (организация, занимающаяся стандартизацией CDMA) с целью оптимизации межсетевое взаимодействия между CDMA и LTE-SAE. Это означает, что операторы CDMA смогут развить свои сети до LTE-SAE и воспользоваться экономией на масштабе и глобальном характере производства чипсетов, что оказало столь мощное позитивное воздействие на успех GSM и WCDMA.

Исходной точкой для стандартизации LTE стала рабочая встреча 3GPP RAN Evolution Workshop, проведенная в ноябре 2004 года в Торонто, Канада. В декабре 2004 года начались исследования, целью которых было выработать временные рамки эволюции технологии радиодоступа 3GPP:

- сокращенная стоимость на бит;
- увеличение объема услуг – больше услуг за меньшую цену с более высокой удовлетворенностью пользователей;
- гибкое использование существующих и новых частотных диапазонов;
- упрощенная архитектура и открытые интерфейсы;
- приемлемое энергопотребление терминалов.

Изучение потребовалось для того, чтобы подтвердить, что концепция LTE сможет обеспечить набор требований, сформулированных в в 3GPP TR 25.913 Feasibility Study of Evolved UTRA and UTRAN.

Разработку LTE разбили на так называемые контрольные точки, а график работ согласовали на пленарных заседаниях 3GPP в Южной Корее в мае и в июне 2007 года. Результаты наглядно показывали, что LTE отвечает, а иногда и превосходит, цели, установленные в отношении пиковых скоростей, пропускной способности сот и спектральной эффективности, а также по производительности VoIP и Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS).

Была поставлена цель завершить стандартизацию LTE до конца 2007 года. После первого релиза были запланированы доработки, которые будут связаны с изменениями требований и функциональности[2].



Рисунок 1.1 – График стандартизации 3GPP LTE

Факты:

- набор исходных требований 3GPP к LTE;
 - повышенная пиковая скорость: 100 Мбит/с в направлении вниз и 50 Мбит/с в направлении вверх;
 - сокращение отклика сети радиодоступа до 10 мс;
 - повышенная спектральная эффективность (в 2-4 раза, по сравнению с HSPA Release 6);
 - эффективная по затратам миграция от радиоинтерфейса и архитектуры Release 6 Universal Terrestrial Radio Access (UTRA);
 - Улучшенная возможность широковещания;
 - IP-оптимизация (фокус на услугах в области пакетной коммутации);
- масштабируемый диапазон от менее, чем 5 МГц до 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц и 20 МГц;
- поддержка работы, как с парными, так и с непарными частотными диапазонами;
 - поддержка межсетевое взаимодействия с существующими системами 3G и системами, которые не стандартизировались 3GPP.

1.3 Архитектура

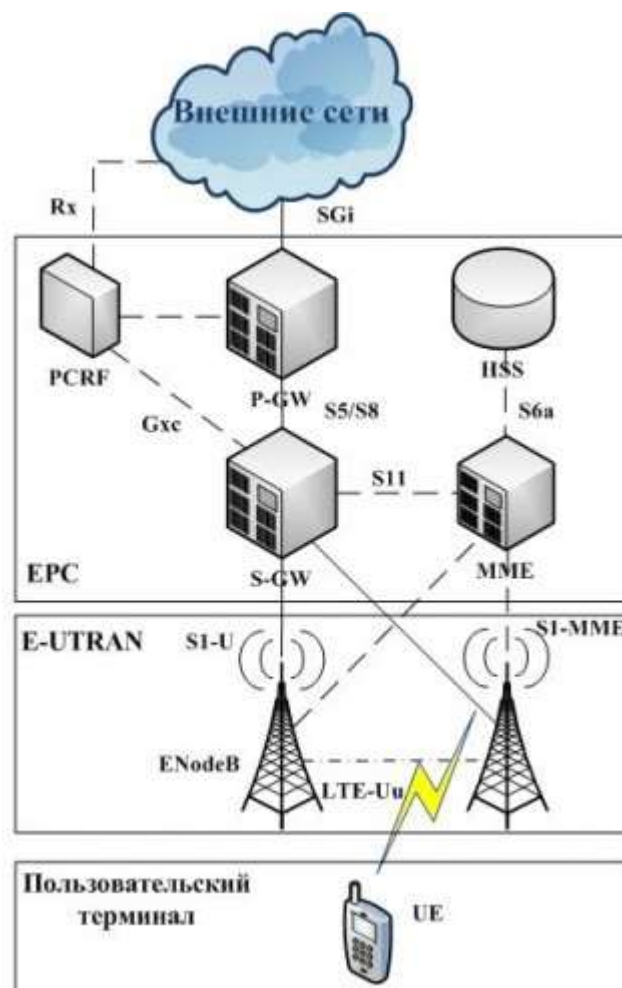


Рисунок 1.2 – Архитектура сети LTE

Сеть LTE состоит из двух важнейших компонентов: сети радиодоступа E-UTRAN и базовой сети SAE(System Architecture Evolution) или EPC(Evolved Packet Core Network).

Основным достижением такой архитектуры, по сравнению с предыдущими поколениями являются меньшие задержки при передаче как пользовательских данных, так и управляющей информации в связи с прохождением через меньшее число промежуточных элементов.

Обмен данными в сети EPC происходит только по IP протоколу с коммутацией пакетов, что существенно отличает сеть LTE от сетей предыдущих поколений, в которых использовалась коммутация каналов между отдельными элементами. В данную сеть входят элементы, отвечающие за управление, маршрутизацию, коммутацию и хранение различных данных, о которых далее будет рассказано более подробно.

Сеть E-UTRAN, состоящая из базовых станций(eNodeB) берет на себя функции радиointерфейса и является связующим звеном между пользовательскими терминалами(UE) и сетью EPC. Основной особенностью, отличающей сеть LTE от сетей других поколений, является то, что базовые станции eNodeB могут обмениваться между собой информацией по протоколу X2 и осуществлять функции управления. В отличие от стандарта GSM, где подсистема базовых станций BSS состояла из базового приемопередатчика BTS и контроллера базовых станций BSC в сети LTE в одном элементе eNodeB объединены функции передатчика и контроллера.

В сети LTE существует два вида трафика: передача пользовательских данных(UP – User Plane) и передача сигнальной информации(CP – Control Plane). Назначение основных элементов сети:

- БС (EnodeB) в сети LTE управляет радиоресурсами, выбирает блок управления мобильностью (MME) при включении в сеть пользовательского терминала при отсутствии у того информации о прошлом подключении, маршрутизирует в пользовательской плоскости пакеты данных по направлению к обслуживающему шлюзу(S-GW), сжимает заголовок IP-пакетов, шифрует поток пользовательских данных.

- MME(Узел Управления Мобильностью — Mobility Management Entity) Это основной управляющий элемент в сети LTE. Он осуществляет только функции управления и не работает с пользовательскими данными. Имеет непосредственную связь с UE через протокол сигнализации вне уровня доступ.

- S-GW(Serving Gateway — обслуживающий шлюз). Предназначен для обработки и маршрутизации пакетных данных поступающих из/в подсистему базовых станций. SGW маршрутизирует и направляет пакеты с пользовательскими данными, в то же время выполняя роль узла управления мобильностью (mobility anchor) для пользовательских данных при хэндовере между базовыми станциями (eNodeB), а так же как узел управления мобильностью между сетью LTE и сетями с другими технологиями 3GPP. Когда UE свободен и не занят вызовом, S-GW подключает нисходящий канал данных (DownLink — DL) и производит пейджинг, если требуется передать

данные по DL в направлении UE. Он управляет и хранит состояния UE (например требования по пропускной способности для IP-сервисов, внутреннюю информацию по сетевой маршрутизации). Он так же предоставляет копию пользовательских данных при узаконенном перехвате.

- PGW - пакетный шлюз — Packet Data Network Gateway. Пакетный шлюз обеспечивает соединение от UE к внешним пакетным сетям данных, являясь точкой входа и выхода трафика для UE. UE может иметь одновременно соединение с более чем одним P-GW для подключения к нескольким сетям. PGW выполняет функции защиты, фильтрации пакетов для каждого пользователя, поддержку биллинга, узаконенного перехвата и сортирование пакетов.

- 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) причем не только для голосовых соединений, но и для пакетных сессий. Charging Function (управление начислением платы) обязательно предусматривает on-line тарификацию, т.е. абонент и оператор могут в реальном времени отслеживать состояние счета. PCRF должен поддерживать несколько моделей начисления платы: по предоставленному объему услуг, по затраченному на услугу времени, по факту предоставления услуги, а также комбинированные модели.

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

1.4 Радиотехнология OFDM

LTE использует OFDM для формирования нисходящего канала, т.е. канала от базовой станции к мобильному устройству. OFDM отвечает требованиям LTE к спектральной гибкости и позволяет создавать эффективные по затратам решения для широкополосных несущих с высокими пиковыми скоростями передачи данных. Это хорошо проработанная технология, о чем свидетельствует целый спектр стандартов, таких, как IEEE 802.11a/b/g, 802.16, HIPERLAN-2, DVB и DAB.

OFDM для обеспечения передачи использует большое количество узкополосных поднесущих. Базовый нисходящий канал LTE на физическом уровне можно рассматривать, как частотно-временную решетку. В частотной области в промежутки между поднесущими Δf составляет 15 кГц.

Продолжительность «символа» OFDM составляет $1/\Delta f$ + префикс цикличности. Префикс цикличности используется для обеспечения ортогональности между поднесущими даже в условиях радиоканала с дисперсией по времени.

Один ресурсный элемент формируется модуляцией QPSK, 16QAM или 64QAM. В случае, если используется модуляция 64QAM, каждый ресурсный элемент обеспечивает передачу 6 бит информации.

Символы OFDM сгруппированы в ресурсные блоки. Ресурсные блоки имеют размер в 180 кГц в частотном измерении и 0.5 мс во временном измерении. Каждый временной интервал передачи (TTI, Transmission Time Interval) состоит из двух слотов (Tslot).

Каждому пользователю присваивается некоторое количество так называемых ресурсных блоков в частотно-временной решетке. Чем больше ресурсных блоков назначается пользователю, и чем более высокая степень модуляции используется в формировании ресурсных элементов, тем более высокий обеспечивается бит-рейт.

Какие ресурсные блоки будут назначены и сколько их получит пользователь в данный момент времени, зависит от усовершенствованного механизма составления частотно-временного расписания. Механизм составления расписания, используемый в LTE, похож на тот, что применяется в HSPA и обеспечивает оптимальное функционирование различных услуг в различных условиях.

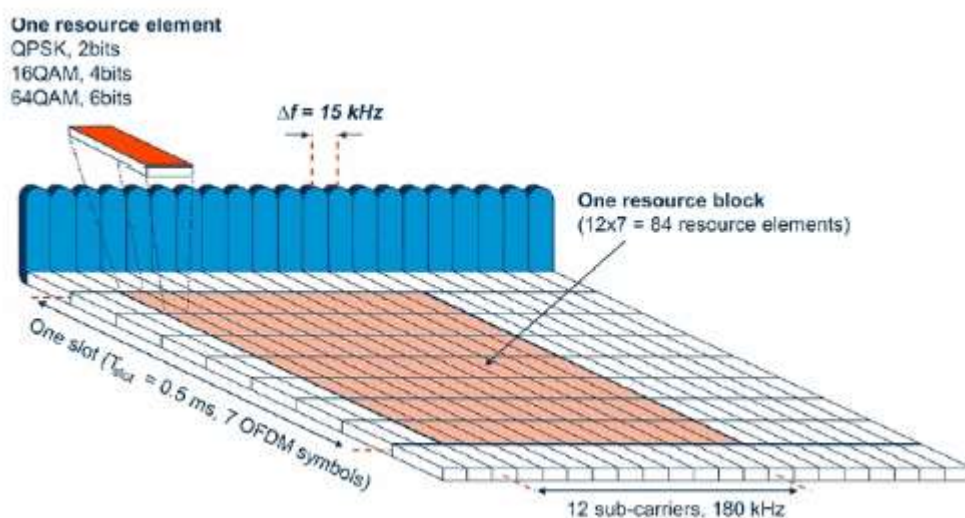


Рисунок 1.3 – Физические ресурсы нисходящего канала LTE основаны на OFDM

В восходящем канале, LTE использует пре-кодированную версию OFDM под названием SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с частотным разделением на базе одной несущей). Это предпринято для того, чтобы компенсировать расходы на OFDM, который отличается очень высоким отношением пиковой мощности к средней мощности радиосигнала (PARP – Peak to Average Power Ratio). Реализация высоких

значений PARP требуют использования дорогих и неэффективных усилителей мощности, предъявляющих высокие требования к линейности, что сказывается на росте стоимости терминалов и скорости разряда батарей.

SC-FDMA позволяет решить проблему за счет объединения ресурсных блоков таким образом, что сокращаются требования к линейности, а также к потребляемой мощности усилителя. Низкие значения PARP кроме того улучшают покрытие и производительность соты.

1.5 Усовершенствованные антенны

Усовершенствованные антенные решения были разработаны для внедрения HSPA (eHSPA) и будут использоваться в системах LTE. Решения, в которых используется несколько антенн, отвечают требованиям к мобильным сетям следующего поколения в отношении пиковых скоростей передачи данных, расширенного покрытия и высокой емкости.

По сути, для достижения этих целей усовершенствованные антенные решения с использованием нескольких антенн – это ключевые компоненты. Нет такого решения антенного устройства, которое отвечало бы каждому возможному сценарию. Соответственно, имеется целое семейство антенных решений для различных сценариев развертывания сети. Высокие пиковые скорости передачи данных, например, могут достигаться за счет использования многослойных антенных решений, таких как 2x2 или 4x4 MIMO, тогда как расширенное покрытие удобнее обеспечивать за счет использования бимформинга.

1.6 Частотные диапазоны для FDD и TDD

LTE имеет возможность использоваться, как в парных (FDD), так и в непарных (TDD) участках диапазона. 1-ые релизы продукта от лидирующих поставщиков будут гарантировать помощь обеих дуплексных схем.

В целом, FDD – гарантирует огромную отдачу и дает наиболее высочайший потенциал применения устройств и инфраструктуры, тогда как TDD имеет возможность выполнять роль неплохого дополнения, к примеру, для заполнения пробелов. Наиболее тщательно читайте в краткой справке (ниже), посвященной FDD и TDD. Так как оснащение LTE фактически идентично для случаев FDD и TDD (не считая фильтров), операторы которые начнут с постройки сетей TDD, сумеют потом пользоваться результатом экономии на масштабе, который даст обширное распределение товаров FDD.

Все сотовые системы связи на сегодняшний день используют FDD, и более 90% частот, употребляемых системами мобильной связи во всем мире – это парные наборы полос частот. В случае FDD, трафик вниз и вверх обеспечивается наряду с этим, в различных частотных диапазонах. В системах TDD, передача в канале вверх и вниз не ведется постоянно, что позволяет использовать для организации канала один и тот же частотный диапазон. К

примеру, если разделить время между передачей вверх и вниз в соотношении 1:1, то направление вверх будет употребляться, лишь на половину времени. Также, для каждого сеанса связи средняя мощность оказывается равна половине пиковой мощности. Так как пиковая мощность является ограниченной регулятором, то в результате чего получается, что для той же пиковой мощности, TDD обеспечивает меньшее покрытие, нежели FDD.

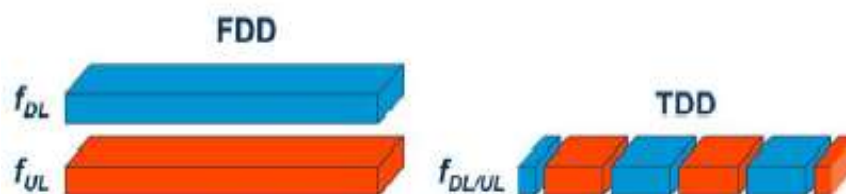


Рисунок 1.4 – Покрытие TDD и FDD

Более того, операторы зачастую хотели бы выделить более, чем половину своих ресурсов для организации канала вниз (чтобы повысить пиковую скорость в этом направлении). Если соотношение DL/UL равно 3:1, то для реализации сети TDD потребуется на 120% больше сайтов, нежели для реализации сети FDD.

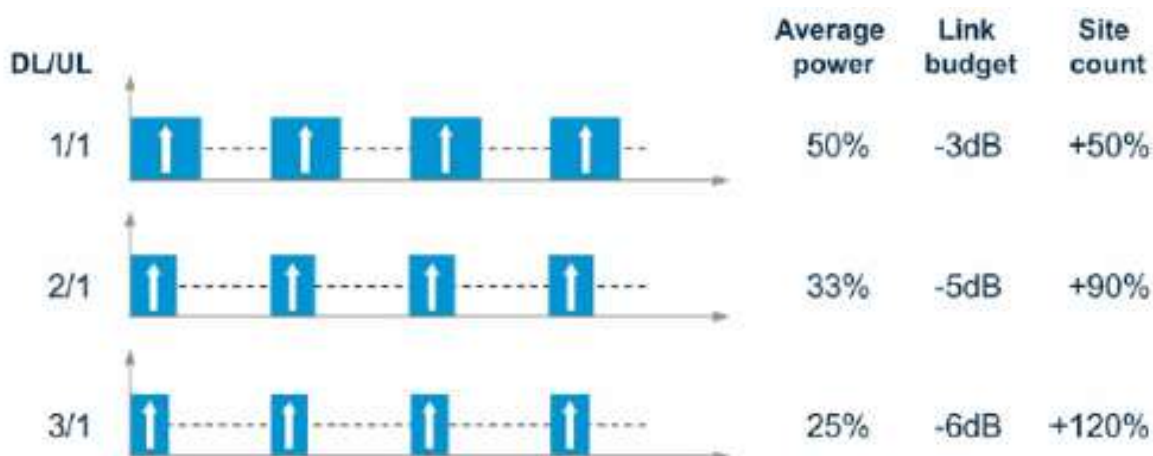


Рисунок 1.5 – Соотношение DL/UL для FDD и TDD

К настоящему времени, 3GPP было выделено 10 различных частотных диапазонов для создания систем LTE-FDD и четыре частотных диапазона для LTE-TDD, как это показано в таблице 1.1. Вероятно, этот список будет расширен за счет добавления других частотных диапазонов, таких, например, как диапазон 700 МГц в США.

Первая инфраструктура сети LTE и терминалы будут с первого же дня поддерживать работу с множеством частотных диапазонов. LTE, таким образом, достаточно быстро сможет обеспечить возможность экономии на масштабах и глобального покрытия.

Таблица 1.1 – FDD (слева) и TDD (справа) - частотные диапазоны, определенные решениями 3GPP (июнь 2007)

FDD Bands		TDD Bands	
Band	Frequencies UL/DL(MHz)	Band	Frequencies UL and DL(MHz)
I	1920-1980/2110-2170	a	1900-1920 2010-2025
II	1850-1910/1930-1990	b	1850-1910 1930-1990
III	1710-1785/1805-1880	c	1910-1930
IV	1710-1755/2110-2155	d	2570-2620
V	824-849/869-894		
VI	830-840/875-885		
VII	2500-2570/2620-2690		
VIII	880-915/925-960		
IX	1749.9-1784.9/1844.9-1879.9		
X	1710-1770/2110-2170		

LTE разработана так, чтобы поддерживать гибкий подход к ширине несущих, которые могут варьировать от менее, чем 5 МГц вплоть до 20 МГц во многих частотных диапазонах, причем, как при построении сети FDD, так и при построении сети TDD. Это означает, что оператор может разворачивать LTE, как в новых, так и в выделенных оператору ранее частотных диапазонах. Первыми могут быть диапазоны, где, в целом, легче будет найти несущие в 10 МГц или в 20 МГц (например, 2.6 ГГц (диапазон VII), AWS (диапазон IV) или диапазон 700 МГц), но, кроме того, LTE можно строить во всех сотовых диапазонах. В отличие от прежних систем сотовой связи, LTE будет быстро развернута в различных частотных диапазонах.

Терминалы фиксированной беспроводной связи (FWT – Fixed Wireless Terminals) – это еще одна возможность эффективного использования мобильного ШПД. FWT можно сравнить с DSL-модемами для подключения к Ethernet, WLAN или POTS различных устройств в офисе или дома. Основное различие в том, что широкополосные услуги обеспечиваются не с помощью медного кабеля, а с помощью радиосети. FWT дают оператору возможность обеспечивать услугу ШПД эффективным по затратам способом для всех абонентов, которые уже располагают настольными компьютерами с подключением к Ethernet или владельцам ноутбуков, способных подключаться к сетям WLAN.

1.7 Ценовая эффективность

Существует значительная и обширная поддержка LTE со стороны мобильной индустрии. Многие поставщики, операторы и исследовательские

институты участвуют в стандартизации данной технологии. Это хорошая база для создания здоровой экосистемы.

Один из ключевых факторов успеха любой технологии – это экономия на масштабе. Преимущества, связанные с объемами, существенны, как для абонентских терминалов, так и для оборудования инфраструктуры. Они сказываются на снижении затрат на производство и позволяют операторам предоставлять абонентам эффективные по цене услуги. Это одна из основных причин, которая привлекает к LTE тех операторов, которые только собираются выйти на рынок с собственной сетью мобильного ШПД.

Развертывание LTE будет осуществляться по различным сценариям, в зависимости от конкретных рыночных условий той или иной страны, регуляторных особенностей. Первые устройства будут мультимодовыми, что позволит говорить о широкой зоне покрытия, мобильности и услуг с первого же дня запуска сети LTE. Существующие стандартные сети мобильной связи можно будет использовать для обеспечения связи там, где LTE еще не внедрена.

Важным является то, что внедрение инфраструктуры LTE настолько просто и эффективно с точки зрения на затраты, насколько это только возможно. Например, должно быть, возможно, осуществить усовершенствование существующих базовых станций радиоподсети до LTE используя легко заменяемые модули, причем они смогут работать, как с одним частотным диапазоном, так и с парными наборами частот.

Отдельные базовые станции для LTE также будет проще установить, чем современное оборудование GSM/WCDMA. Запуск сети, ее эксплуатация и менеджмент могут быть упрощены за счет использования таких функций, как «включил и работает» и «авто-оптимизация», что позитивно сказывается на сокращении капитальных и операционных затрат оператора.

LTE позиционируется в качестве сети, которая отвечает требованиям к сетям мобильной связи следующего поколения – как для существующих операторов 3GPP/3GPP2, так и для новичков рынка. Эта технология позволит операторам оказывать высокопроизводительные услуги мобильного ШПД для широкой аудитории, используя комбинацию высоких пиковых скоростей и пропускной мощности системы, как в направлении «вниз», так и в направлении «вверх», причем с низким временем отклика.

Инфраструктура LTE разработана с тем, чтобы быть как можно более простой в развертывании и эксплуатации, для чего разработана гибкая технология, способная оставаться работоспособной в широком наборе частотных диапазонов. LTE подразумевает возможность масштабирования частотных диапазонов, может работать в полосе частот менее 5 МГц и вплоть до 20 МГц, а также поддерживает, как парные частотные диапазоны для FDD, так и одиночные – для TDD. Архитектура LTE-SAE сокращает число узлов, поддерживает гибкие конфигурации сети и обеспечивает высокий уровень доступности услуг. Кроме того, LTE-SAE будет обеспечивать межсетевое взаимодействие с сетями GSM, WCDMA/HSPA, TD-SCDMA и CDMA.

Возможностями LTE-сети можно будет воспользоваться не только с помощью мобильного телефона, но также с помощью ноутбука, камеры, камкордера, фиксированных беспроводных терминалов и других устройств, ориентированных на использование мобильного ШПД.

1.8 Радиодоступ

Большой интерес вызывает развитие сетей беспроводного доступа, имеющих бесспорное преимущество при отсутствии кабельной инфраструктуры, в труднодоступных и малонаселенных районах. Другим достоинством систем радиодоступа является быстрота их развертывания и возможность поэтапного наращивания по мере необходимости. Главными недостатками являются ограниченная пропускная способность и относительно высокая стоимость в расчете на абонента. Все системы WLL ориентированы, прежде всего, на предоставление услуг аналоговой телефонии, что нельзя назвать недостатком для условий Казахстана. Среди наиболее распространенных технологий, используемых в системах радиодоступа, можно назвать стандарты сотовой телефонии DAMPS, GSM, стандарты беспроводной телефонии CT-2 и DECT, а также технологии CDMA и некоторые частные протоколы, как, например, FH TDMA и другие.

Стоимость решения на основе радиодоступа складывается, во-первых, из стоимости проектирования, подготовительных инжиниринговых работ, частотных присвоений, а также инфраструктуры оборудования радиодоступа. Все эти расходы (назовем их стартовыми) мало зависят от числа абонентов и практически не зависят от длины беспроводной абонентской линии (в пределах зоны действия системы). Второй составляющей расходов в системе радиодоступа является абонентский терминал. Эта составляющая растет линейно с ростом количества абонентов, но также не зависит от длины линии.

Поставим задачу по построению сети абонентского доступа, характерную с нашей точки зрения для оператора связи в Казахстане.

Условия применения оборудования. Коммутационные станции:

- цифровые, различных производителей;
- аналоговые, различных систем (координатные, иногда декадно-шаговые).

Распределительная сеть:

- разветвленная сеть медно-кабельных линий невысокого качества в городских районах (для базовых операторов);
- отсутствующая или недостаточно-развитая собственная сеть;
- неразвитая сеть кабельных линий в сельской местности и пригородах.

Потребность в услугах:

более 95%:

- аналоговый телефон;
- передача данных с помощью модема/факса.

до 5%:

- высокоскоростное подключение к сетям передачи данных или сети ISDN.

Приоритеты для оператора при выборе средств абонентского доступа могут быть различны. Например, у базовых операторов, основная задача которых состоит в 100% телефонизации и основная часть клиентов, которые нуждается в традиционных телефонных услугах, приоритеты при выборе оборудования чаще расставляются следующим образом:

- цена;
- скорость развертывания;
- затраты на обслуживание;
- гибкость с точки зрения предоставления интегрированных услуг;
- мобильность.

У альтернативных операторов задача, как правило, состоит в более быстром, чем у конкурирующих базовых операторов, обеспечении традиционной связью состоятельной части населения и предоставлении высококачественных услуг (в том числе и нетрадиционных) абонентам делового сектора. Приоритеты выбора оборудования для них несколько иные:

- скорость развертывания;
- гибкость с точки зрения предоставления интегрированных услуг;
- мобильность;
- цена;
- затраты на обслуживание.

Попробуем сделать качественный анализ различных технологий и посмотреть, в какой степени они отвечают поставленной задаче – телефонизация с использованием различных технологий абонентского доступа. Из анализа таблицы 1.2 можно сделать вывод, что альтернативные операторы будут тяготеть к трем более современным способам решения проблемы доступа (уплотнение и радиодоступ), так как именно они позволяют решить вопрос подключения абонентов существенно быстрее, чем в случае прокладки медного кабеля, либо предоставить больший набор услуг.

Т а б л и ц а 1.2 – Качественный анализ технологий

Параметр	Уплотнение АЛ	Применение ВОЛС	Радиодоступ	Медный кабель
Цена	Низкая (\$150)	Средняя (\$200...\$600)	Высокая (\$500..\$1000)	Средняя (\$100...\$300)
Скорость разверт.	Высокая (1 день)	Низкая (3..12 мес.)	Средняя (2..4 мес.)	Низкая (3...12 мес.)
Затраты на обслужив.	Низкие	Низкие	Низкие	Высокие
Гибкость (полоса пр.)	Средняя (до 2 Мбит/с)	Высокая (до 155 Мбит/с и выше)	Низкая (обычно до 32 кбит/с)	Низкая (аналоговая передача)
Мобильн.	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая

Такой вывод подтверждается и практикой. Большинство альтернативных операторов значительно раньше базовых начали использовать оборудование ЦСПАЛ и широко внедрять ВОЛС. Радиодоступ, как технологическое решение, получил распространение сравнительно недавно, но уже очевидно, что и в мировой и отечественной практике это решение для городской связи применяется в основном альтернативными операторами, тогда как для сельской связи оно эффективно и у базовых операторов связи (рисунок 1.6)

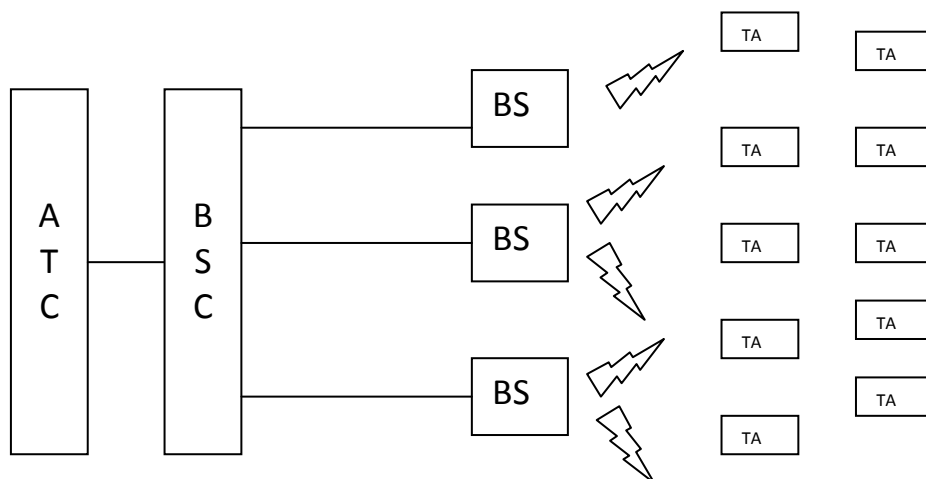


Рисунок 1.6 – Беспроводный доступ

Теперь попробуем проанализировать стоимостные показатели различных способов организации доступа. Стоимостный анализ, безусловно, является чрезвычайно важным для современного оператора, стремящегося к наибольшей экономической эффективности своей деятельности.

Рассмотрим случай модернизации городской АТС. Задача состоит в раздаче новых телефонных номеров (количество которых увеличилось по сравнению с существовавшим ранее в 2-4 раза) абонентам, равномерно распределенным в радиусе до 5 км от АТС. Количество абонентов, подключаемых в каждой точке, как правило, для этого случая составит не более 10. Этот параметр существенен для проводных технологий (медный кабель и ВОЛС). Для ЦСПАЛ количество подключаемых в каждой точке абонентов не существенен (при наличии кабельных вводов в каждое здание), а для радиодоступа количество подключаемых абонентов рассчитывается на всю зону радио покрытия, то есть все количество дополнительно введенных номеров, как правило, более 600. Рассмотрим применение различных способов доступа для данной задачи.

Как видим, при коротких АЛ (либо участках АЛ, подлежащих усилению) традиционное кабельное решение все еще оказывается наиболее дешевым. Однако, при увеличении длины АЛ свыше 1...1,5 км, эффективным становится применение ЦСПАЛ, ВОЛС и радиодоступ оказываются более дорогими решениями для данной задачи. При выборе между усилением кабельного ввода и применением ЦСПАЛ оператору целесообразно учитывать также временной

фактор, ведь во время строительно-монтажных работ оператор не получает оплаты от клиента. Принимая во внимание все вышесказанное, а также, основываясь на практическом опыте взаимодействия с операторами, для решения данной задачи можно рекомендовать применение ЦСПАЛ при длине участка АЛ, подлежащего усилению, более 100 метров.

Теперь рассмотрим следующую типовую задачу – телефонизацию объектов нового строительства (жилых домов, бизнес центров и т.д.). Для этой задачи характерно относительно небольшая длина АЛ (до 5 км), а также большое число абонентов, подключаемых в одной точке (здании или квартале) – более 500 терминалов.

Применение ЦСПАЛ для решения поставленной задачи невозможно, поскольку кабельный ввод в здание отсутствует, а, следовательно, нечего уплотнять. Поэтому сравнению подлежат другие технологии. Радиодоступ, как и в первом случае, оказывается самым дорогим решением. Гибкость радио решения (возможность быстро переставлять абонентские терминалы с места на место в пределах зоны действия) также не принципиальна для рассматриваемого случая, так как все абоненты заведомо будут находиться в пределах объекта на постоянных местах. Конкурирующими решениями остаются прокладка медного или волоконно-оптического кабеля. Время, требуемое на прокладку, практически одинаково. Более того, для случая нового строительства, когда каблирование может осуществляться одновременно с окончательной отделкой зданий, даже радиодоступ не дает выигрыша во времени.

Теперь рассмотрим типовую задачу для сельской местности, пригородов, районов малоэтажной застройки. Для этой задачи характерны отсутствие инфраструктуры медных кабельных линий (поэтому невозможно или ограничено применение ЦСПАЛ), малое количество абонентов, подключаемых в каждой точке, а также большое расстояние от АТС до мест расположения абонентов (до 10 и более километров).

Как видно из анализа, наиболее эффективным было бы использование ЦСПАЛ. Там, где это возможно (то есть существует какая-либо кабельная сеть), рекомендуется применять ЦСПАЛ с большим коэффициентом уплотнения (до 60 линий по одной паре) или с динамической концентрацией. Как правило, такая возможность в сельской местности имеется там, где существуют кабельные линии, на которых смонтированы системы типа К-12 или ИКМ-15, ИКМ-30. При переоборудовании данных линий на основе использования технологий HDSL появляется возможность выносов номерной емкости АТС, установленных в крупных населенных пунктах, до пригородов или сел.

Однако, во многих случаях применение ЦСПАЛ невозможно совсем ввиду полного отсутствия кабельной инфраструктуры. Для этого случая вероятно и отсутствие кабельной канализации, что существенно удорожает кабельные решения относительно рассмотренных ранее задач по телефонизации в городских районах. В сельской местности меньше (а чаще и

вовсе отсутствует) спрос на нетрадиционные высокоскоростные услуги (передача данных и т.д.), поэтому качественное преимущество ВОЛС (большая пропускная способность) несущественно. Как видим, для данной задачи радиодоступ может оказаться наиболее приемлемой альтернативой. Практика других стран подтверждает этот вывод.

Рассмотрев теоретически несколько типовых задач телефонизации, автор естественно не исчерпал всех возможных и рентабельных применений для тех или иных средств доступа. Например, радиодоступ и ЦСПАЛ часто используются как временные решения, чтобы обеспечить связь до завершения прокладки кабеля либо для организации каких-либо разовых мероприятий (фестивали, спортивные состязания и т.д.). Во многих случаях, особенно в деловых районах, операторы прокладывают ВОЛС не для предоставления аналоговых телефонных услуг, а для предоставления цифровой связи. Для этих же целей могут быть использованы и специализированные радиосредства.

Мы дали лишь обобщенный и, естественно, упрощенный сравнительный анализ технологий абонентского доступа. В каждом конкретном случае необходимо учитывать множество объективных факторов, таких как разброс стоимости ЦСПАЛ в зависимости от типа, потребность (в том числе и потенциальная) в тех или иных услугах, доступность радиочастот в данном регионе и так далее. Поэтому рекомендуем операторам обращаться к поставщикам средств доступа с постановкой задачи, а затем вместе анализировать различные возможности ее решения с целью оптимизации технико-экономических параметров.

2 Экспериментальная часть

2.1 Исследование помехоустойчивости MIMO-OFDM систем

LTE – технология, которая до сих пор не имеет никаких коммерчески действующих реализаций, позволяющая получить ответы на все увеличивающееся количество вопросов относительно того, которые предлагаются в современном мире [11].

Сравнительному анализу различных методов детектирования сигналов в системах с многоэлементными антенными решетками посвящено достаточно большое число научных работ. Основными из этих методов являются метод максимума правдоподобия (Maximum Likelihood – ML) и метод наименьших квадратов (Zero Forcing – ZF). Однако в известных работах сравнение ограничивалось исследованием систем с низкими порядками модуляции. Например, в работах [12] рассматривались только модуляции с небольшим числом M бит на один символ (BPSK: $M = 1$, QPSK: $M = 2$). В этих работах было показано, что разница в характеристиках MIMO-систем, использующих различные методы детектирования сигналов, значительна и составляет порядка 6–10 дБ. При этом авторами отмечалась высокая сложность реализации ML-метода.

В настоящей работе исследуется помехоустойчивость MIMO. Эта проблема особенно актуальна в системах радиодоступа, работающих в сложных условиях распространения сигналов. Традиционным решением этой проблемы является расширение полосы частот и/или повышение излучаемой мощности. Тем не менее, применимость этих методов имеет недостатки. В частности, из-за требований биологической защиты и электромагнитной совместимости повышение мощности и расширение полосы частот ограничено [13].

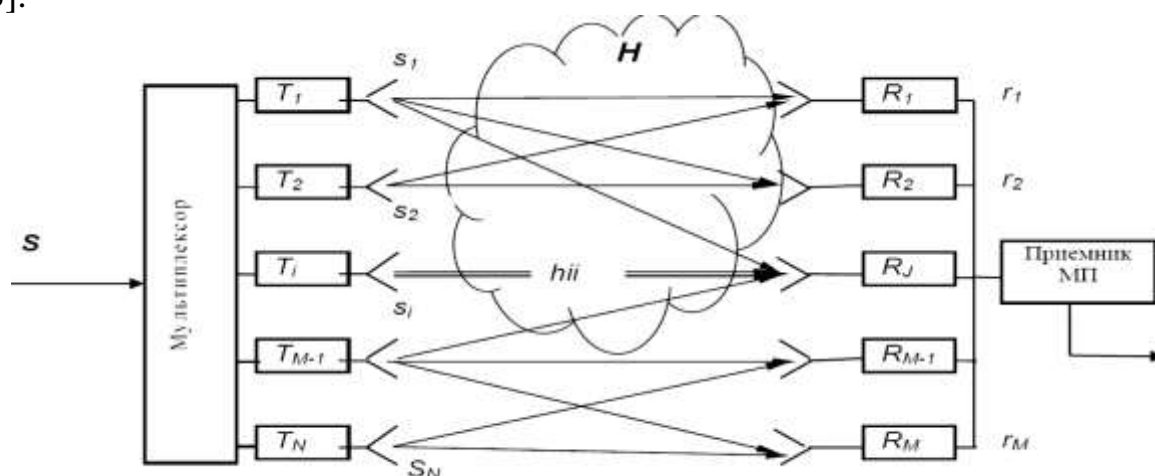


Рисунок 2.1 – Общая структура системы MIMO

Одним из самых эффективных способов решений этой проблемы на сегодняшний день может быть применение антенных решёток со

слабокоррелированными антенными элементами, на основе которых реализуется технология ММО [14].

На рисунке 2.1 представлена общая структура системы ММО, которая позволяет увеличить пропускную способность линии связи за счет формирования физически различных каналов.

В работе исследована структурная схема имитатора радиопередачи. Для этого была создана программная реализация ММО канала в среде Simulink пакета прикладных программ MatLAB. Из всевозможных вариантов построения ММО канала была выбрана архитектура на основе пространственно-временного кодирования. Такая схема предложена Alamouti [15] и является наиболее эффективным видом неадаптивной радиопередачи, так как объединяет пространственное и временное разнесения. Структурная схема имитатора изображена на рисунке 2.2.

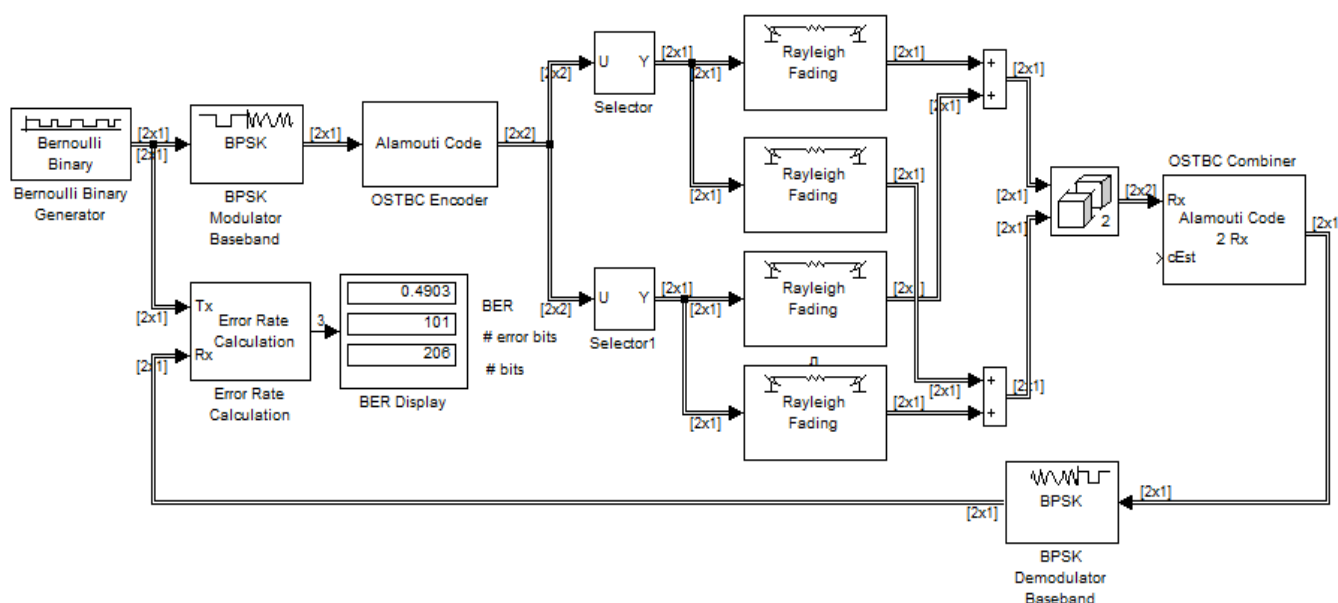


Рисунок 2.2 – Структурная схема ММО канала(2×2) в среде Simulink

Структурная схема состоит из блоков: Bernoulli Binary Generator (генератор случайного двоичного кода); BPSK Modulator (Demodulator) Baseband (модулятор (демодулятор) сигнала ФМ-2); OSTBC Encoder(Combiner) (ортогональный пространственно-временной блочный кодер(декодер), выполняет функцию кодирования(декодирования)); Error Rate Calculation (счётчик ошибок в канале); BER Display (отражает показания счётчика ошибок в канале); Selector (выполняет функцию демультиплексирования); Multipath Rayleigh Fading Channel (среда распространения сигнала, имитирующая релейские замирания).

Алгоритм работы состоит в следующем: источник сигнала формирует случайную последовательность, которая поступает на вход модулятора ФМ-2. Модулятор формирует сигналы для передачи по сигнальному созвездию, закладывая информацию в изменение фазы. Далее промодулированный сигнал поступает на вход пространственно-временного кодера блоками по 2 символа,

он формирует матрицу по определенному закону, каждая строка которой поступает отдельно на излучающую антенну. В канале сигнал претерпевает всевозможные воздействия и поступает на приемную антенну, после чего на пространственно-временной декодер, где по определенному закону восстанавливают переданную последовательность. Затем следует демодулятор ФМ-2, а после устройство, сравнивающее сигнал на передаче и на приеме, результата выводится на счетчик ошибок.

В работе исследовалась помехоустойчивость MIMO-OFDM-систем связи с двумя конфигурациями $N_t \times N_r$ передающих и приемных антенн (2×2 и 2×4). Результаты моделирования для 2×2 -MIMO-OFDM-системы (с двумя передающими и двумя приемными антеннами) представлены в таблице 1 и 2 для BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM модуляций соответственно. Поскольку современные стандарты локальных радиосетей являются системами пакетной передачи данных, то в качестве меры помехоустойчивости использовалась вероятность пакетной ошибки. Длина пакета выбиралась равной 1000 байтов. В моделировании использовалась модель частотно-селективного канала с экспоненциальным профилем временного затухания. Среднеквадратичная задержка канала равнялась 50 нс. Частотно-временные параметры OFDM-символов выбирались согласно рекомендациям стандарта IEEE 802.11a, а число поднесущих бралось равным 96, что эквивалентно удвоению полосы передачи этого стандарта.

В таблице 2.1 приведены относительные потери в отношении сигнал-шум ZF-метода по отношению к ML-методу при фиксированном значении вероятности пакетной ошибки ($PER = 0.01$).

Т а б л и ц а 2.1 – относительные потери в отношении сигнал-шум ZF-метода по отношению к ML-методу для 2×2 -MIMO

Скорость кода, R	Модуляция	SNR _{ML} – SNR _{ZF}
1/2	BPSK	~5 дБ
3/4	BPSK	~7 дБ
1/2	QPSK	~4,5 дБ
3/4	QPSK	~7 дБ
1/2 16	QAM	~3 дБ
3/4 16	QAM	~4 дБ
2/3 64	QAM	~2 дБ
3/4 64	QAM	~3 дБ

Из таблицы 2.1 видно, что относительные потери в отношении сигнал-шум ZF-метода по отношению к ML-методу меньше при QAM- модуляции и большей скорости кода.

В таблице 2.2 приведены относительные потери в отношении сигнал-шум ZF-метода по отношению к ML-методу при фиксированном значении вероятности пакетной ошибки ($PER = 0.01$) для 2×4 -MIMO-OFDM-системы с

двумя передающими и четырьмя приемными антеннами. Из сравнения данных в таблицах 2.1 и 2.2 видно, что разница в характеристиках ML- и ZF-схем детектирования существенно убывает с ростом числа приемных антенн.

Т а б л и ц а 2.2 – относительные потери в отношении сигнал-шум ZF-метода по отношению к ML-методу для 2×4-MIMO

Скорость кода, R	Модуляция	SNR _{ML} – SNR _{ZF}
1/2	BPSK	~1 дБ
3/4	BPSK	~2 дБ
1/2	QPSK	~0,5 дБ
3/4	QPSK	~1 дБ
1/2 16	QAM	~ 0,2дБ
3/4 16	QAM	~0,6 дБ
2/3 64	QAM	~0,1 дБ
3/4 64	QAM	~0,4 дБ

Из таблицы 2.2 видно, что относительные потери в отношении сигнал-шум ZF-метода по отношению к ML-методу для 2×4-MIMO меньше, чем для 2×2-MIMO.

Реализован имитатор MIMO-канала в среде Simulink пакета прикладных программ MatLAB, также MIMO-OFDM-система связи с двумя конфигурациями $N_t \times N_r$ передающих и приемных антенн (2×2 и 2×4).

Относительные потери в отношении сигнал-шум BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM модуляций для 2×4 в 4-5 раз меньше, чем 2×2-MIMO-OFDM-системы.

3 Расчетная часть

3.1 Расчет возможной зоны покрытия для системы

Произведем расчет дальности связи между антенной базовой станции (BS-AU) и абонентского блока (SU) на стороне абонента. Оценить ожидаемую дальность связи между блоками AU и SU системы.

Исходные данные для расчета:

- устройство доступа (AU);
- мощность передатчика – 28 дБм;
- минимальный порог уровня на входе приемника – 68 дБм;
- частота приема – 3,5 ГГц;
- частота передачи – 3,5 ГГц;
- затухание в фильтрах и антенных разделителях – 15дБ;
- диаграмма направленности антенны – 60°;
- коэффициент усиления антенны БС – 11 дБ;
- высота расположения антенны – 40 м;
- блок фиксированного абонентского доступа (FAU);
- диаграмма направленности – 6,1°;
- коэффициент усиления антенны – 13,5 дБм;
- высота приемной антенны (FAU) – от 3 до 10 м;
- напряженность поля, при которой обеспечивается достаточное качество приема, равна 53 дБ.

Определим зону покрытия одной БС по методике расчета, которая основана на данных о распространении радиоволн над среднепересеченной местностью. В расчете приведены кривые распространения радиоволн, которые положены в основу метода расчета (рисунок 3.1).

Данные кривые построены при использовании передатчика мощностью 1 кВт, который создает в пунктах приема на расстоянии r , напряженность поля E , соответствующие пересечению вертикали с кривой высоты, передающей антенны. Но реальные характеристики передатчиков отличаются от принятых в кривых, поэтому вводятся поправочные коэффициенты, а общая расчетная формула имеет вид [7]:

$$E = E_C + B_{P.H.} + B_{\phi} + B_{h_2} + B_{PEЛ} + (\alpha \cdot l) - D_{RPU} - D_{FAU} + B_{\theta}, \quad (3.1)$$

где E_C – напряженность поля сигнала, необходимая для получения заданных показателей. E_C дана в технической документации к оборудованию, $E_C=53$ дБ;

$B_{p.h.}$ – поправка, учитывающая отличие номинальной мощности передатчика от мощности 1 кВт, принятой для кривых, дБ;

B_{ϕ} – затухание в резонаторных, мостовых фильтрах и антенных разделителях, $B_{\phi}=7$ дБ;

B_{h_2} – поправка, учитывающая высоту приемной антенны, дБ;

$B_{\text{рел}}$ – поправка, учитывающая рельеф местности, дБ;
 $\alpha \cdot 1$ – затухание в фидере передающей и приемной антенны, дБ. В данном типе оборудования не используется, т.к. соединение с блоком RPU происходит с помощью цифровой соединительной линии HDSL;
 D_{AU} – коэффициент усиления антенны БС RPU, $D_{\text{RPU}}=11$ дБ;
 D_{SU} – коэффициент усиления антенны абонентского оборудования AU, $D_{\text{SU}}=13,5$ дБ;
 B_{θ} – поправка, учитывающая уменьшение восприимчивости к помехам по сравнению с четвертьволновым штырем, дБ.

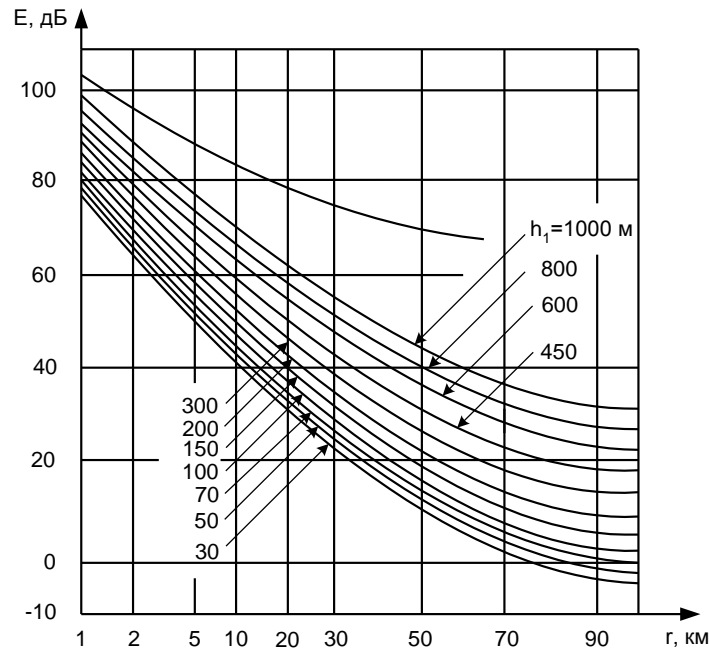


Рисунок 3.1 – Кривые распространения радиоволн над поверхностью земли в городской зоне

Определим поправку $B_{P.H}$ по следующей формуле:

$$B_{P.H} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1000}{P_H}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{1000}{0,316}\right) = 35 \text{ дБ}, \quad (3.2)$$

где P_H – номинальная мощность передатчика, $P_H=316$ мВт.

Определим поправку B_{h_2} , учитывающую высоту приемной антенны отличную от 1,5 м, по формуле:

$$B_{h_2} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1,5}{h_2}\right) \cdot 10 \cdot \lg\left(\frac{1,5}{10}\right) = -8,2 \text{ дБ}, \quad (3.3)$$

где h_2 – высота приемной антенны, $h_2=10$ м.

Поправка, учитывающая реальный рельеф местности $V_{\text{рел}}$ в зоне действия системы радиодоступа, определяется следующим образом. Графики зависимости дальности связи от напряженности поля при различных высотах передающих антенн БС составлены на основании обработки статистической информации об изменениях в условиях среднепересеченной местности. Среднепересеченной считается такая местность, на которой среднее колебание отметок высот на расстоянии 10-15 км от БС не превышает 50 м. График для определения рельефа местности, приведен на рисунке 3.2. Для определения колебания уровня местности Δh , рисуют рельеф местности и определяют колебание Δh . Когда Δh отличается от 50 м в ту или иную сторону, следует вносить поправки, определяемые по графикам рисунка 3.2а и рисунка 3.2б для $r < 100$ км. Антенна БС системы Breeze ACCESS имеет секторную конструкцию, один сектор имеет зону охвата 60° , то для охвата зоны в 360° , используется шесть секторов. Дальность связи на каждом секторе определяется из рельефа местности, наличия строений, или других препятствий для прохождения сигнала в прямой видимости.

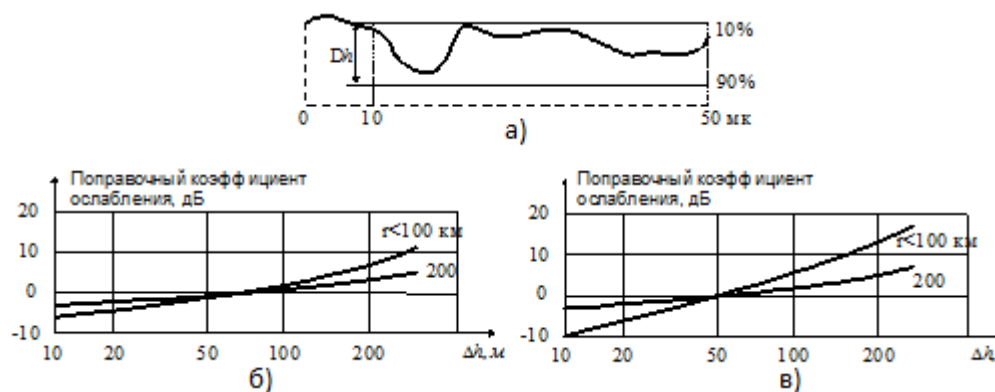


Рисунок 3.2 – Графики для определения поправки, учитывающей рельеф местности: а) рельеф местности, б) и в) графики для определения поправок

По графикам на рисунке 3.2 определим поправку $V_{\text{рел}}$ с учетом рельефа и строений для каждого сектора:

- первый сектор. Характеризуется наличием строений высотой до 10 м. Поправка $\Delta h_1 = 10$ м. Поправка на рельеф $V_{\text{рел}} = -10$ дБ;

- второй сектор. Характеризуется наличием одно-двух этажными домами и наличием деревьев высотой до 10 м. Поправка $\Delta h_2 = 10$ м. Поправка на рельеф, $V_{\text{рел}} = -10$ дБ;

- третий сектор. Характеризуется наличием одно-двух этажными домами и наличием деревьев высотой до 10 м. Поправка $\Delta h_3 = 10$ м. Поправка на рельеф, $V_{\text{рел}} = -10$ дБ;

- четвертый сектор. Характеризуется наличием высотных строений (высота до 28 м). Поправка $\Delta h_4 = 28$ м. Поправка на рельеф $V_{\text{рел}} = -3$ дБ;

- пятый сектор. Характеризуется высотой строений до 10 м. На расстоянии пяти километров начинается предгорье, высота местности достигает 100 м, относительно уровня расположения БС. Поправка $\Delta h_4=100$ м. Поправка на рельеф $V_{\text{рел}}=7$ дБ;

- шестой сектор. Характеризуется преобладанием в зоне радиохвата пяти этажных зданий на расстоянии до 5 км. Все постройки и деревья на более дальнем расстоянии не превышают 14 м. Поправка $\Delta h_1=15$ м. Поправка на рельеф $V_{\text{рел}}=-6$ дБ.

Рассчитаем поправку ΔB_θ , учитывающую уменьшение восприимчивости к помехам по сравнению с четвертьволновым штырем:

$$\Delta B_\theta = 10 \cdot \lg\left(\frac{\theta_E}{360}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{6,1}{360}\right) = -17,7 \text{ дБ}, \quad (3.4)$$

где θ_E – угол диаграммы направленности принимающей антенны, $\theta_E=6,1^\circ$.

Подставляя значения в формулу (3.1), определим напряженность поля, создаваемое передающей базовой станцией (БС) в пункте приема абонентской станцией:

для первого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 10 - 11 - 13,5 - 17,7 = 34,6 \text{ дБ};$$

для второго сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 10 - 11 - 13,5 - 17,7 = 34,6 \text{ дБ};$$

для третьего сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 10 - 11 - 13,5 - 17,7 = 34,6 \text{ дБ};$$

для четвертого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 3 - 11 - 13,5 - 17,7 = 41,6 \text{ дБ};$$

для пятого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8,2 + 7 - 11 - 13,5 - 17,7 = 51,6 \text{ дБ};$$

для шестого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 6 - 11 - 13,5 - 17,7 = 38,6 \text{ дБ};$$

По полученным значениям напряженности поля создаваемого БС в пункте приема, определим дальность связи для каждого сектора по графику на рисунке 3.1. Дальность связи каждого сектора составляет:

- на первом, втором и третьем – 20 км при $E=34,6$ дБ;
- на четвертом – 13 км при $E=41,6$ дБ;
- на пятом – 8 км при $E=51,6$ дБ;
- на шестом – 17 км при $E=38,6$ дБ.

На рисунке 3.3 изображена дальность связи на каждом секторе. Полученные результаты могут отличаться от реальных значений. Сравнивая полученные данные дальности связи можно определить, что средняя дальность связи составляет 16 км, что соответствует средней дальности связи по технической документации.

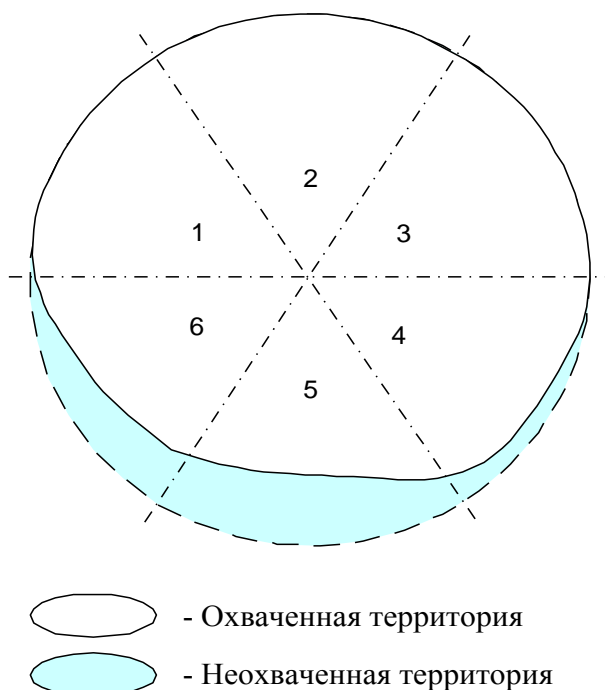


Рисунок 3.3 – Зоны покрытия каждой базовой станции

3.2 Суммарная вероятность ухудшения качества связи

Суммарная вероятность ухудшения качества связи из-за глубоких замираний сигнала, обуславливается в общем случае тремя причинами:

- а) экранировкой препятствиями минимальной зоны Френеля при субрефракции радиоволн $T_0(V_{\min})$;
- б) интерференцией в точке приема прямого луча и лучей отраженных от слоистых неоднородностей тропосферы $T_{\text{инт}}(V_{\min})$;
- в) ослаблением сигнала из-за дождей $T_{\text{д}}(V_{\min})$.

Таким образом[7]:

$$T_{\text{пр}}(V_{\min}) = T_0(V_{\min}) + T_{\text{инт}}(V_{\min}) + T_{\text{д}}(V_{\min}). \quad (3.5)$$

Определяем среднее значение просвета:

$$H(g) = H(0) + \Delta H(g), \quad (3.6)$$

$$\Delta H(g) = -(R_0^2/4)g \cdot k(1-k),$$

$$\Delta H(g) = -(39 \cdot 10^3)^2/4 \cdot (-10 \cdot 10^{-8}) \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 9,51 \text{ м},$$

$$H(g) = 23,14 + 9,51 = 32,65 \text{ м}.$$

Относительный просвет:

$$P(g) = H(g)/H_0 = 32,65/22,66 = 1,44 \quad (3.7)$$

Вероятность ухудшения качества связи из-за экранировки препятствием минимальной зоны Френеля при субрефракции радиоволн зависит от формы верхней части препятствия. Для унификации расчетов принято аппроксимировать препятствие любой формы сферой. Параметр μ , характеризующий аппроксимирующую сферу, определяют следующим образом: проводят прямую АВ параллельно радиолучу на расстоянии $\Delta y = H_0$ от вершины препятствия и из профиля находят ширину препятствия $r = R_0 = 39$ км.

$$\mu = \sqrt[3]{k(1-k) \cdot l} \cdot \sqrt[6]{64 \cdot \pi \alpha / 3}, \quad (3.8)$$

где $l = r/R_0 = 39/39 = 1$;

$$\alpha = \Delta y/H_0 = 1$$

$$\mu = \sqrt[3]{0,5 \cdot 0,5} \cdot \sqrt[6]{64 \cdot 3,14/3} = 0,79.$$

Определяем множитель ослабления V_0 при $H(0)=0$ [1], $V_0 = -18$ дБ.

Рассчитаем значение относительного просвета $p(g_0)$, при котором наступает глубокое замирание сигнала, вызванное экранировкой препятствием минимальной зоны Френеля.

$$p(g_0) = (V_0 - V_{\min})/V_0, \quad (3.9)$$

$$p(g_0) = [-18 - (-33,67)]/-18 = -0,87.$$

Рассчитаем параметр Ψ :

$$\Psi = 2,31 \cdot A[p(g) - p(g_0)], \quad (3.10)$$

$$A = 1/\sigma \cdot \sqrt{\lambda / [R \cdot k(1-k)]},$$

$$A = 1/10,5 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{15,8 \cdot 10 / [(39 \cdot 10) \cdot 0,5 \cdot 0,5]} = 0,983,$$

$$\Psi = 2,31 \cdot 0,983 \cdot [1,44 - (-0,87)] = 5,3.$$

Определяем значение $T_0(V_{\min})$ [2], $T_0(V_{\min}) \approx 0$ %.

Расчет величины $T_{\text{инт}}(V_{\min})$ на пересеченном пролете определяется только замираниями из-за отражений радиоволн от слоистых неоднородностей тропосферы.

$$T_{\text{инт}}(V_{\min}) = V_{\min}^2 \cdot T(\Delta \epsilon), \quad (3.11)$$

где V_{\min} – в относительных единицах;

$$V_{\min} = -33,67 \text{ дБ};$$

$$V_{\min}^2 = 4,3 \cdot 10^{-4}.$$

$$T(\Delta\varepsilon) = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot \xi \cdot R_0 \cdot \sqrt{f}, \quad (3.12)$$

где $\xi = 1$ для сухопутных трасс;
 R_0 – в километрах;
 f_0 – в гигагерцах.

$$T(\Delta\varepsilon) = 4,1 \cdot 10^{-4} \cdot 39^2 \cdot \sqrt{1,9} = 1,63 \%,$$

$$T_{\text{инт}}(V_{\min}) = (4,3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1,63 = 3 \cdot 10^{-7} \%.$$

Предельно допустимая интенсивность дождя J для данного пролета определяется по известному значению $V_{\min} = -33,67$ дБ, таким образом, $J > 190$ мм/ч.

По найденной интенсивности дождя определяем $T_d(V_{\min}) \approx 0,00014 \%$.
 Суммарная вероятность ухудшения качества по формуле 3.6:

$$T_{\text{пр}}(V_{\min}) = 0 + 3 \cdot 10^{-7} + 14 \cdot 10^{-5} = 1,4 \cdot 10^{-4} \%.$$

3.3 Расчет качественных показателей

Рассчитаем качественные показатели (категорию обслуживания для любого времени действия и вероятность обслуживания), обеспечиваемые системой на улицах микрорайона, застроенного одно- двухэтажными и более зданиями, в зоне радиусом 10 км.

Исходные данные:

- частота приема абонентской станции равна 2 ГГц;
- номинальная чувствительность приемника при соотношении сигнал\шум на выходе 20 дБ, $G_h = 1,5$ мкВ;
- полоса частот телефонного канала равна 0,3-3,4 кГц;
- общее затухание элементов антенно-фидерных устройств, $V_{\text{ф.пер}} = 9,7$ дБ;
- выходная номинальная мощность передатчика, $P_n = 30$ Вт ($P_n = 14,8$ дБ);
- высота антенны базовой станции над нулевой отметкой местности, $h_{01} = 210$ м;
- высота приемной антенны абонентского терминала над уровнем земли, $h_2 = 2$ м;
- ширина полосы пропускания приемника, $\Pi_{\text{пр}} = 25$ кГц;
- длина фидера приемной антенны (РК-75-7-11), $l_{\text{ф.пр}} = 4$ м;
- длина фидера передающей антенны (РК-75-7-11), $l_{\text{ф.пер}} = 50$ м;
- средняя высота зданий, $h_{\text{зд}} = 20$ м;
- средняя ширина улиц, $2b = 30$ м.

Преобладающими на указанной частоте являются индустриальные помехи.

Среднее эффективное значение напряженности поля индустриальных помех определяем по формуле[7]:

$$E_{и.эф} = (E_{и} + 0,115 \sigma_E^2)_{из} + 10 \lg \Pi_{пр} - 20 \lg \Pi_{из} + 10 \lg F_{и} - 2,7 ; \quad (3.13)$$

$$E_{и.эф} = 9 \text{ дБ} = 3 \text{ мкВ/м.}$$

Определяем напряженность поля суммарных помех по формуле[7]:

$$E_{п.эф} = 10 \lg \left[E_{и.эф}^2 + E_{п.эф}^2 + E_{к.эф}^2 + \frac{G_H^2 (\alpha l)_{пр}^2}{(S/N)_{пр.вх}^2 h_{д.пр}^2} \right] ; \quad (3.14)$$

Другими видами помех по сравнению с индустриальными пренебрегаем.

$$P_{\partial} = P_n - B_{ф.пер}, \quad (3.15)$$

$$B_{ф.пер} = B_{ф} + B_n + (\alpha l_{ф})_{пер} - \sigma_{пер} . \quad (3.16)$$

где $B_n = 1 \text{ дБ}$;

$(\alpha l_{ф})_{пер} = 9 \text{ дБ}$;

$\alpha = 0.18 \text{ дБ/м}$;

$\sigma_{пер} = 3 \text{ дБ}$.

Определяем эффективно излучаемую мощность базовой станции:

$$P_{\partial} D_{y} = 14,8 - 9,4 = 5,4 \text{ дБ.} \quad (3.17)$$

Определяем напряженность поля, создаваемую базовой станцией в наиболее характерных пунктах приема на границе зоны обслуживания.

Для приема на открытых площадях используют формулу:

$$E_{с.о} = K_2 + K_3 + K_4 + \Delta E_n + 60 \text{ дБ.} \quad (3.18)$$

Коэффициенты которого определяют по номограмме рисунка 3.4.

K_2 находим по семейству кривых четвертого квадранта для $P_{д} D_{y} = 0,0035 \text{ кВт}$ и приведенной высоты передающей антенны:

$$h_1^{\wedge} = h_{01} - h_{02} - h_{з\partial} = 201 - 140 - 20 = 50 \text{ м,} \quad (3.19)$$

интерполируя между кривыми 0,003 и 0,004, определяем $K_2=11$ дБ.

K_3 находим по графику второго квадранта для зоны радиусом действия $r = 10$ км: $K_3 = -40$ дБ.

K_4 находим по семейству кривых третьего квадранта для $\lambda=1,72$ м и $h_2=2$ м: $K_4=7$ дБ.

ΔE_n определим по графику (рисунок 3.5), $\Delta E_n=-3$ дБ.

Подставляя найденные коэффициенты в формулу (17), получаем:

$$E_{c.o} = 11 - 40 + 7 - 3 + 60 = 35 \text{ дБ.}$$

Для приема на радиальных улицах используем формулу:

$$E_{cp} = M_1 + M_2 + M_3 + \Delta E_n + 60. \quad (3.20)$$

Коэффициенты определяем по номограмме рисунка 3.6.

M_1 находим по семейству кривых первого квадранта: для $Z = h_{зд} - h_2 = 18$ м и $b=22,5$ м, интерполируя между кривыми 20 и 25, определяем $M_1=20$ дБ.

$M_2 = 40$ дБ определяем по семейству кривых четвертого квадранта для $P_{лДy}=0,0035$ кВт и $h=50$ м.

$M_3 = -44$ дБ определяем по кривой третьего квадранта для зоны действия радиусом $r=10$ км и высоты приемной антенны $h_2=2$ м.

$\Delta E_n = -2$ дБ.

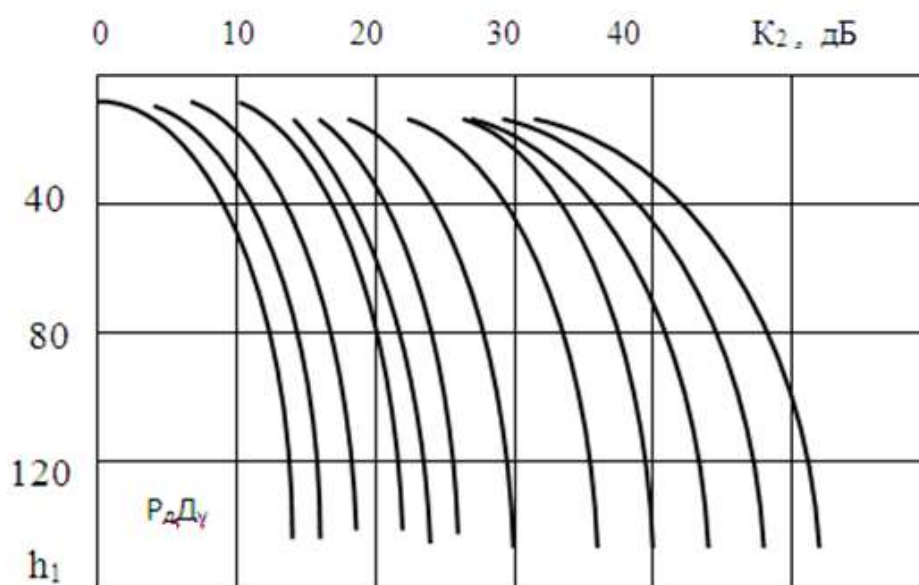


Рисунок 3.4 – Номограмма для определения K_2

Подставим найденные коэффициенты в формулу (3.20), получаем:

$$E_{c.p} = -20 + 40 - 44 - 2 + 60 = 34 \quad \text{дБ.}$$

Для приема на поперечных улицах используем формулу:

$$E_{c.n} = K_2 + K_3 + K_4 + \Delta E_n + 60. \quad (3.21)$$

Коэффициенты которого определяем по номограмме рисунка 3.4:

$$K_1 = -18 \text{ дБ}; K_2 = -16 \text{ дБ}; K_3 = 11 \text{ дБ}; K_4 = -40 \text{ дБ}; \Delta E_n = -3 \text{ дБ.}$$

Подставим найденные значения в формулу (19):

$$E_{c.n} = -16 + 11 - 40 - 3 + 60 = 12 \text{ дБ.}$$

Определяем значения защитного отношения R_d .

Для открытых площадей:

$$R_{d0} = E_{c0} - E_{и.эф} = 35 - 9,6 = 25,4 \text{ дБ.} \quad (3.22)$$

Для радиальных улиц:

$$R_{d.p} = E_{c.p} - E_{и.эф} = 34 - 9,6 = 24,4 \text{ дБ.} \quad (3.23)$$

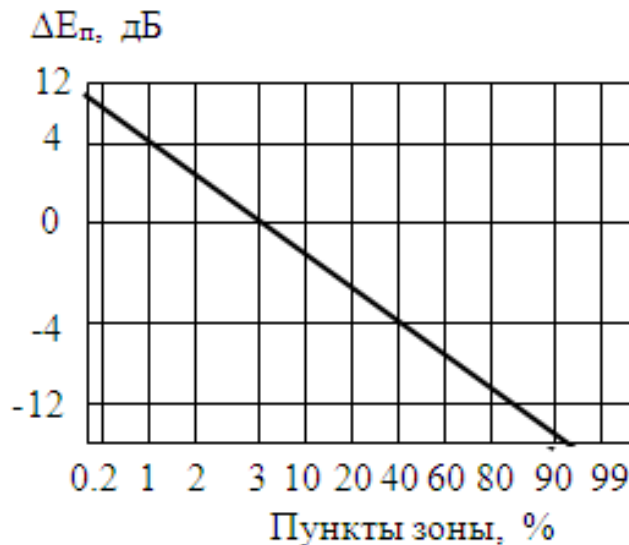


Рисунок 3.5 – Номограммы для расчета напряженности поля

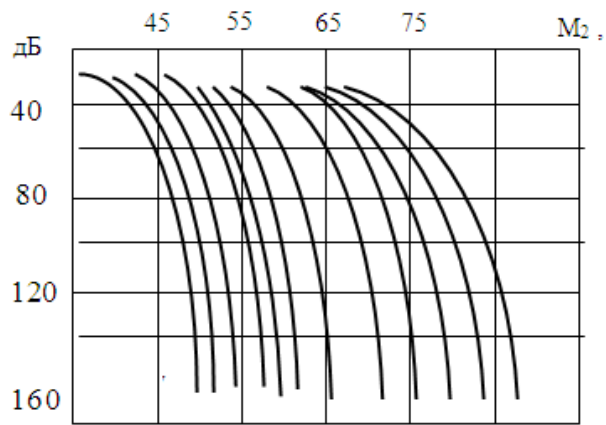


Рисунок 3.6 – Номограмма для определения M_2

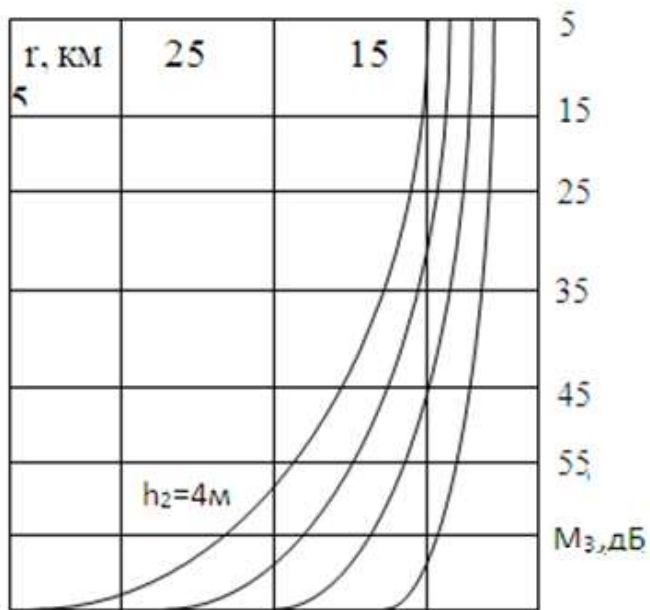


Рисунок 3.7 – Номограмма для определения M_3

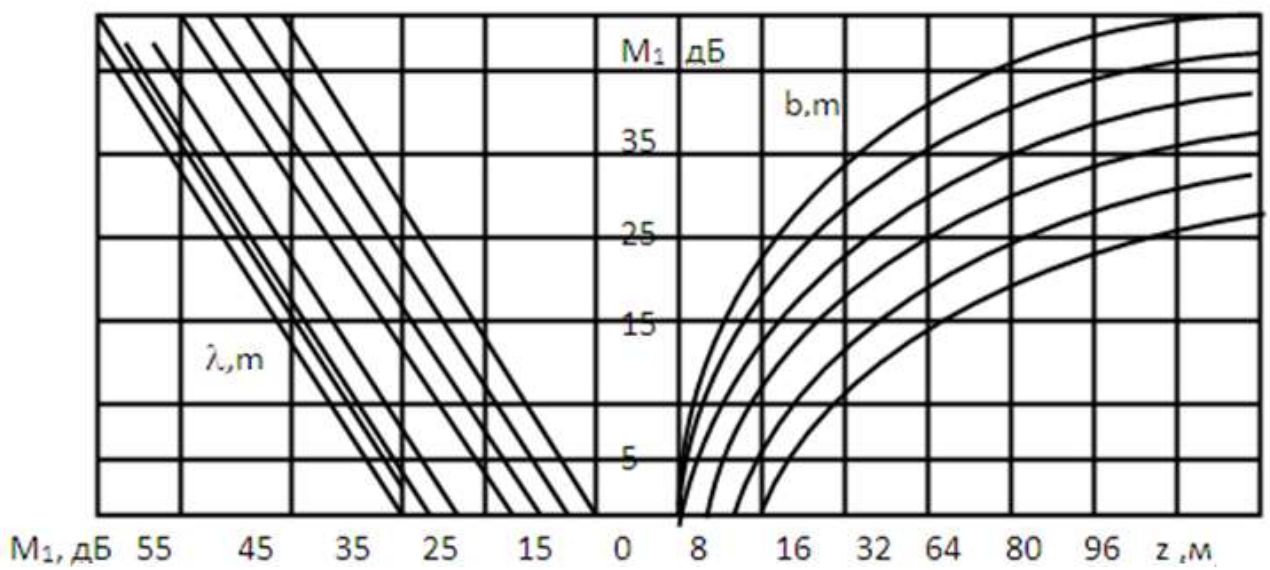


Рисунок 3.8 – Номограмма для определения M_1

Для поперечных улиц:

$$R_{д.п} = E_{с.п} - E_{и.эф} = 12 - 9,6 = 2,4 \text{ дБ.} \quad (3.24)$$

Определяем категорию обслуживания, обеспечиваемую базовой станцией на границе зоны обслуживания для 70% пунктов и произвольно выбранного времени действия 90%.

В результате расчета получены следующие значения $R_{д}$, дБ:

- для передачи данных - 14,7;
- для передачи речи – 31,7;
- для открытых площадей $R_{д} > R_{мин}$ ($25,4 \gg 14,7$);
- для радиальных улиц $R_{д.р} > R_{мин}$ ($24,4 \gg 14,7$);
- для поперечных улиц категория обслуживания неудовлетворительна.

Поэтому определим максимальное расстояние, на котором обеспечивается заданная категория обслуживания. Для этого находим уровень сигнала, который обеспечит в пункте приема категорию обслуживания 90% разборчивости при $R_{д.мин} = 14,7$ дБ:

$$E_{с.п}^1 = E_{и.эф} + R_{д.мин} = 9,6 + 14,7 = 24,3 \text{ дБ,} \quad (3.25)$$

$$K_{зп} = E_{с.п} - K_1 - K_2 - \Delta E_{п} - 60, \quad (3.26)$$

При условии $E_{с.п} = 24,3$ дБ определяем:

$$K_3 = 24,3 + 16 - 11 + 3 - 60 = -27,7 \text{ дБ.}$$

А по рисунку 3.4(второй квадрант) находим искомое расстояние $r = 5,5$ км.

Построим график зависимости $R_{д0} > R_{д мин}$ от α_2 , где α_2 – время действия, %. Для построения графика составим таблицу 3.1, в которой $R_{д} = E_{с} - E_{п}$.

Т а б л и ц а 3.1 – Полученные данные

α_2 %	Защитное отношение сигнал/помеха, дБ		
	Для площадей	Для радиальных улиц	Для поперечных улиц
50	30,9	29,9	20,2
70	28,4	27,4	17,7
90	25,4	24,4	14,7
95	23,9	22,9	13,2

Решение, представленное на рисунке 3.4, получено в условиях некоторой неопределенности, связанной с допущением постоянства сигнала во времени, приближенной оценкой уровня помех и параметров технической системы. В

связи с этим результаты расчета следует рассматривать с учетом некоторой вероятности их реализации на практике – вероятности обслуживания.

Вероятность обслуживания определяется стандартными отклонениями величин, участвовавших в расчете: $\sigma_{c, t}$, которая учитывает замирания в течение длительного времени, определяемые по кривым, в соответствии с рисунком 16 ($\sigma_{c, 50} = 0$; $\sigma_{c, 90} = 1,5$ дБ; $\sigma_{c, 99} = 5,5$ дБ); $\Delta\sigma_t$, которая учитывает отклонение уровней помех от средних значений в течение длительного времени ($\Delta\sigma_{50} = 0$; $\Delta\sigma_{90} = 5$ дБ; $\Delta\sigma_{99} = 8$ дБ); σ_R , которая учитывает неопределенность выбранного значения R_d (выбираем примерно равной 2 дБ).

Общая неопределенность:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{cm}^2 + \Delta\sigma_t^2 + \sigma_R^2} \quad (3.27)$$

Так как при взаимной независимости эти значения имеют нормальное распределение вероятности, то график $\sigma_T(\alpha_2)$ строят по трем точкам рисунок 16. Первой точкой кривой является величина $\sigma_{50} = \sqrt{\sigma_R^2} = 2$ дБ. Второй точкой кривой можно выбрать, например, величину $\sigma_{90} = \sqrt{\sigma_{c90}^2 + \Delta\sigma_{90}^2 + \sigma_R^2} = 5,6$ дБ. Третья точка кривой, например, имеет значение $\sigma_{99} = \sqrt{\sigma_{c99}^2 + \Delta\sigma_{99}^2 + \sigma_R^2} = 9,9$ дБ.

Вероятность обслуживания определяется в зависимости от нормированного аргумента – процента времени действия $t_a = (R_{d70} - R_{d50}) / \sigma_T$, где R_t определяется по таблице 3.1, а σ_T – по рисунку 3.10.

Так, если $R_{d70} = 28,4$ дБ; $R_{d50} = 30,9$ дБ, а $\sigma_{T70} = 3$ дБ, то

$t_a = (R_{d70} - R_{d50}) / \sigma_T = -0,83$, а вероятность обслуживания равна 0,2, т.е. чем больше время действия, тем меньше вероятность обслуживания при неизменном сигнале.

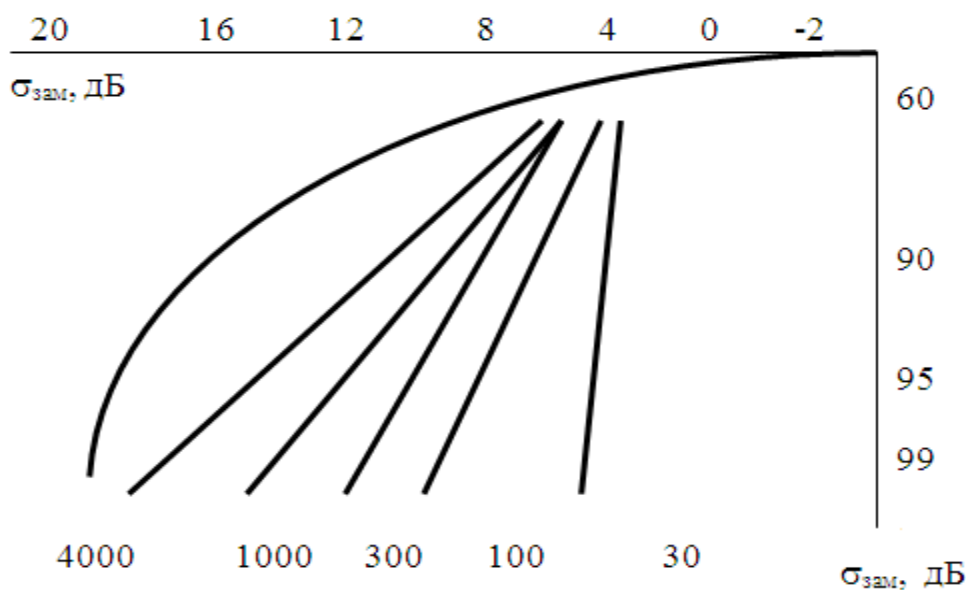
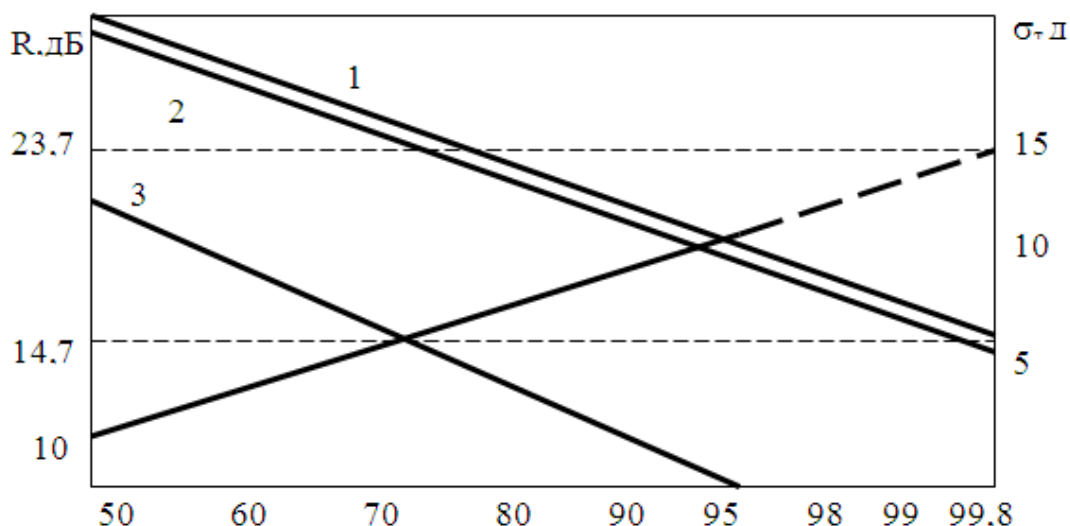


Рисунок 3.9 – Графики замираний по Буллингтону



1 - на открытых площадях; 2 - на радиальных улицах; 3 - сигнал/помеха

Рисунок 3.10 – Расчетные значения защитных отношений на поперечных улицах

3.4 Расчет пропускной способности системы

Отличительной и положительной особенностью системы является наличие параметров QoS (Quality of Service) – параметров качества услуги, которые возможно регулировать.

QoS состоит из: CIR (Committed Information Rate) гарантированной полосы пропускания и MIR (Maximum Information Rate) – максимальной скорости передачи. Именно QoS, как свойство системы, позволило реализовать VoIP (Voice over Internet Protocol) – передачу голоса без потери качества, что обычно считается проблемой.

Для сжатия речи в системе используются кодеки G.711 (64 кбит/с), G.729 (8 Кбит/с) и G.723.1 (6,3 кбит/с).

Кроме того, наличие CIR позволяет планировать емкость системы в случае превышения физических возможностей сети. Так, если количество пользователей в ячейке – соте превышает физические возможности БС в 10 раз, то вероятность достижения значения CIR, т.е. получения абонентом гарантированной полосы пропускания, равна 97%. Таким образом, для БС на 6 секторов количество пользователей с CIR=64 кбит/с и MIR=128 кбит/с в диапазоне 2,4 равно 960, а в диапазоне 3,5 равно 1740, соответственно со значением 0,1 Эрланг на абонента.

В случае, когда, к примеру, CIR = 512 К, а вероятность достижения CIR составляет 99,5%, общее количество пользователей равно 18 и 32 соответственно. При распределении абонентов, когда, к примеру, у 20% пользователей CIR=256 кбит/с имеющих 80% трафика, а у 80% пользователей CIR=64 кбит/с соответственно имеющих 20% трафика, емкость системы 2,4 в ячейке с базовой станцией на 6 секторов составляет порядка 300 абонентских

устройств. Емкость системы в диапазоне 3,5 ГГц за счет использования технологии частотного дуплекса (FDD) выше, а максимальное количество абонентов путем планирования емкости системы и использования возможности совместной работы трех AU (Access Unit) – устройств доступа в одном секторе можно довести до 5220 абонентских устройств.

3.5 Оценка требуемого числа каналов и вероятности потери вызова

Данная методика расчета основана на методе динамики моментов, базирующемся на тех же исходных линейных дифференциальных уравнениях теории непрерывных марковских цепей, описывающих изменение вероятностей дискретных состояний в непрерывном времени, что и формула Эрланга. Метод предусматривает агрегирование состояний однородных и независимых элементов системы на основании того, что среднее число E_i элементов, находящихся в i -м состоянии, есть произведение общего числа элементов $N(\sum E_i = N)$ на вероятность p_i пребывания в состоянии i .

В данном случае элементами системы являются абоненты, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний: в пассивном 1 и в состоянии занятия второго канала на время сеанса связи (рисунок 3.11).

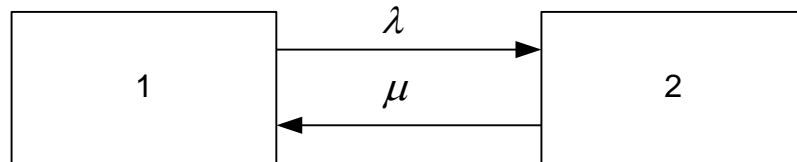


Рисунок 3.11 – Состояние системы

Если λ и μ – интенсивности перехода одного абонента между состояниями 1, 2, то уравнения динамики средних имеют вид:

$$\frac{dE_1}{dt} = -\lambda \cdot E_1 + \mu \cdot E_2, \quad (3.28)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \lambda \cdot E_1 - \mu \cdot E_2. \quad (3.29)$$

Отсюда для установившегося режима:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{dE_2}{dt} = 0. \quad (3.30)$$

Таким образом, среднее число занятых каналов равно:

$$E_2 = N \cdot \rho \cdot (1 + \rho), \quad (3.31)$$

где ρ – приведенная интенсивность заявок

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3.32)$$

Пусть случайная дискретная величина x_{ij} может принимать только два значения:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й элемент находится в состоянии } i \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3.33)$$

Ряд распределения имеет для каждого j один и тот же вид:

- при $x_i=0$, $p_i=1-p_i$;
- при $x_i=1$, $p_i=p_i$.

Здесь p_i – вероятность пребывания в состоянии i .

Поэтому дисперсия численности состояния $i = 2$ есть сумма N одинаковых значений дисперсии величины $x_{ij} = x_i$:

$$D[x_2] = (0 - p_2)^2 \cdot (1 - p_2) + (1 - p_2)^2, \quad (3.34)$$

$$D_2 = E_2 \cdot \left(1 - \frac{E_2}{N}\right) = N \cdot \rho \cdot (1 + \rho)^2. \quad (3.35)$$

В соответствии с «правилом трех сигм» практически возможное максимальное значение числа занятых каналов составляет $E_2 + 3 \cdot \sqrt{D_2}$ (естественно, в предположении о нормальном распределении числа занятых каналов). На этом основании требуемое число n каналов для обслуживания N абонентов, каждый из которых создает в ЧНН нагрузку ρ , выражается как:

$$n = \frac{(N \cdot \rho + K \cdot \sqrt{N \cdot \rho})}{1 + \rho}, \quad (3.36)$$

где K – коэффициент допустимости отказа, определяемый как значение аргумента (нормированного средним квадратическим отклонением) при подходящем значении функции нормального распределения.

Коэффициент K выбирается из условия допустимости отказа. При допустимости в среднем одного отказа на 70 вызовов $K=2,2$. При допустимости в среднем одного отказа на 100 вызовов $K=2,31$.

Определим число требуемых каналов n на соединительной линии между проектируемой станцией EWSD и сетью СТОП для 1000 абонентов:

$$n = \frac{(1000 \cdot 0,05 + 2,31 \cdot \sqrt{1000 \cdot 0,05})}{1 + 0,05} \approx 63 \text{ канала.}$$

Для оценки точности формулы сравним результаты вычислений с результатами вычислений, вычисленных по первой формуле Эрланга. Такое сопоставление произведем для $p = 0,05$ (т. е. для нагрузки одного абонента 0,05 эрл), результаты показали, что различие между двумя методами расчета составляет 14 %.

Рассчитаем вероятность потери вызова. Для определенных выше (по методу динамики средних) математического ожидания E_2 и дисперсии D_2 и в соответствии с предположением о нормальном распределении случайной численности состояния вероятность отказа $P_{\text{ОТК}}$ можно выразить через интеграл Лапласа:

$$\Phi(y) = \left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot \int_0^y \exp \cdot \left(\frac{-t^2}{2} \right) \cdot dt. \quad (3.37)$$

Т.е. вероятность превышения такой случайной величиной значения n , или превышения отклонения от среднего $E_2 = \frac{N \cdot \rho}{(1 + p)}$ величины $n - E_2$:

$$P_{\text{ОТК}} \approx 1 - 2 \cdot \Phi n \cdot \left[\frac{1 + \rho}{\sqrt{N \cdot \rho} - \sqrt{N \cdot \rho}} \right] \quad (3.38)$$

Подстановка дает вероятность отказа $P_{\text{ОТК}}$:

$$P_{\text{ОТК}} \approx 1 - 2 \cdot \Phi[K] \quad (3.39)$$

Ошибка составляет:

$$\Delta P_{\text{ОТК}} = P_{\text{ОТК}} - P_n, \quad (3.40)$$

где P_n соответствует вероятности потерь по первой формуле Эрланга и определяется только ошибкой Δn по формуле (38), а также ошибкой, связанной с предположением о нормальном распределении численности состояния.

Влияние ошибки Δn на погрешность определения $P_{\text{ОТК}}$ можно оценить из сопоставления с вычислениями по первой формуле Эрланга при $K=2,2\dots 2,31$ (т. е. для $P_{\text{отк}}=0,01\dots 0,014$), $N \geq 20$ и значениях $0,04 \leq \rho \leq 0,1$, характерных для нагрузки, создаваемой в ЧНН средним абонентом квартирного телефона. В частности, $\Delta P_{\text{отк}} < 0,03 P_n$ для $\Delta n = (0,01\dots 0,015)n$ и погрешность определения $P_{\text{ОТК}}$ из-за ошибки оценки n порядка 1...1,5% составляет менее 7% или по

абсолютному значению $\Delta P_{отк} < 0,0004$. Следовательно, существенной может быть только погрешность, вносимая допущением о нормальном законе распределения.

3.6 Оценка погрешности по сходимости распределений.

В соответствии с приведенным выше рядом распределения величины x_{ij} распределение суммы N независимых случайных величин считается биномиальным и поэтому верна следующая оценка:

$$P(|n - E_2| \geq K \cdot \sqrt{D_2}) \leq \frac{4}{(9 \cdot K)^2} \quad (3.41)$$

В правой части неравенства отсутствует параметр N , поэтому даже при $N < 10$ вероятность превышения числом $|n - E_2|$ величины $K \cdot \sqrt{D_2}$ для $K=2,2...2,31$ и $\rho = 0,05...0,1$ составляет не более $0,042...0,046$. С ростом N биномиальное распределение быстро стремится к нормальному. Степень приближения нормальному распределению определяется близостью величины эксцесса нулевому значению.

На рисунке 3.12 показано (в логарифмических шкалах) изменение максимального значения эксцесса. График соответствует вероятности не менее 0,015 вызова от одного абонента в течение средней длительности разговора. При увеличении N от 10 до 1000 величина эксцесса приближается к нулевому значению эксцесса нормального распределения (уменьшается с шести до 0,06), т. е. «островершинность» симметричной кривой плотности биномиального распределения практически исчезает.

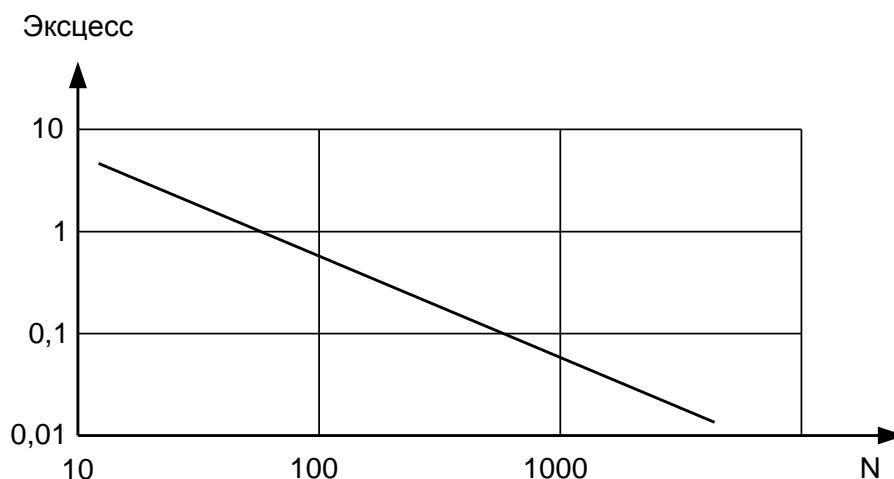


Рисунок 3.12 – График изменения максимального значения эксцесса

Таким образом, как формулу (3.36) для числа каналов, так и приближенную формулу (3.37) для вероятности потери вызова можно считать

приемлемыми с точностью порядка 1% (причем последнюю для практических случаев, когда рассматриваются тысячи и десятки тысяч абонентов).

3.7 Расчет задержек при передаче речи

Сообщение упорядочено по времени их поступления в очереди. После того как в канале заканчивается передача очередного сообщения, то управление переходит к программе «Привратник». Программа выбирает сообщение с наивысшим приоритетом для очередной передачи, если очереди более старших приоритетов оказываются пустыми. Выбранное сообщение для передачи захватывает канал на все время его передачи. Если в систему поступает N простейших потоков сообщений с интенсивностями $\lambda_1, \dots, \lambda_N$, средние длительности передачи сообщений каждого типа равны τ_1, \dots, τ_N , и вторые начальные моменты соответственно равны $\tau^{(2)}_1, \dots, \tau^{(2)}_N$, то среднее время ожидания в очереди сообщений t_k , имеющих приоритет K , определяется соотношением:

$$t_k = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \tau^{(2)}_i}{2(1 - R_{k-1})(1 - R_k)}, \quad (3.42)$$

где $R_{k-1} = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_{k-1}$,

$$R_k = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_k,$$

$$t_x = \frac{2 \cdot 0,01}{2(1 - 0,18)(1 - 0,2)} = \frac{0,02}{1,64 \cdot 0,8} = \frac{0,02}{1,312} = 0,015 \text{ с.}$$

Получим соотношение среднеквадратичного отклонения времени передачи сообщения:

$$t_k = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \tau_i (1 + \nu^2_i)}{2(1 - R_{k-1})(1 - R_k)}, \quad (3.43)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$.

$$t_x = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} [1 + 1^2]}{2(1 - 0,18)(1 - 0,2)} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1,312} = 3,048 \cdot 10^{-3} = 0,003 \text{ с.}$$

Данный алгоритм задержек сообщений при передаче речи представлен на рисунке А1 в приложении.

Заключение

В данной магистерской диссертации рассмотрены характеристики радиодоступа на базе технологии LTE, а также некоторые варианты расширения сети абонентского доступа городской телефонной сети, с помощью использования системы радиодоступа. В нынешнее время тема проекта является весьма насущна, и соответствует фактическим сложностям в сфере телефонизации и технологии сетей. Также в работе рассмотрены актуальность и преимущества сетей LTE, сравнение с сетями предыдущих поколений.

Техническое решение состоит из радиочасти, т. е. базовых станций, и опорной сети, которая развернута на базе сервисных и пакетных шлюзов, сервера с базой абонентов, сервера управления мобильностью и сервера политик. Ядро сети сформировано с учетом дальнейшего роста, при необходимости количество радиосайтов может быть смело увеличено в 10 раз без риска перегрузить трафиком опорную сеть. Что касается покрытия, то радиус соты БС при работе сети в диапазоне 700 МГц в условиях городской застройки может составлять около 2 км (в зависимости от трафик-модели), а в условиях менее плотной застройки или сельской местности радиус может увеличиться до 5-10 км при аналогичных с городскими параметрами использования трафик-модели абонентов.

В ходе экспериментальных данных, исследована структурная схема имитатора радиопередачи. Для этого была реализована программная реализация MIMO канала в среде программы Simulink. Также исследована помехоустойчивость связи с двумя конфигурациями $N_t \times N_r$ (2×2 и 2×4) передающих и приемных антенн MIMO-OFDM-систем.

Относительные потери в отношении сигнал-шум BPSK, QPSK, 16-QAM и 64-QAM модуляций для 2×4 в 4-5 раз меньше, чем 2×2 -MIMO-OFDM-системы.

Список литературы

- 1 Бабаков В. Ю., Вознюк М. А., Михайлов П. А. Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
- 2 Вишневецкий В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX и LTE. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009.
- 3 Гельгор А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.
- 4 Гольдштейн Б. С., Соколов Н. А., Яновский Г. Г. Сети связи: Учебник для ВУЗов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2010.
- 5 Кааринен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы. – М.: Техносфера, 2007.
- 6 Печаткин А. В. Системы мобильной связи. Часть 1. – РГАТА, Рыбинск, 2008.
- 7 Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Юрчук А. Б. Сети мобильной связи LTE: технология и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010.
- 8 Л.Г. Мордухович Радиорелейные линии связи. Курсовое и дипломное проектирование: Учебное пособие для техникумов. – М: Радио и связь, 1989..
- 9 Девицына С. Н. Методическое указание по дипломному проектированию по специальностям: «Сети связи и системы коммуникаций». – Ижевск.: Изд-во ИжГТУ, 2006.
- 10 Трибушная В.Х. Учебно-методическое пособие для выполнения раздела «Технико-экономическое обоснование дипломного проекта» - Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. – 25 с.
- 11 Системы радиосвязи /Под редакцией Н.И. Калашникова.- Москва: Радио и связь.
- 12 Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. 2 – е изд. – СПб: Изд – во «Вильямс», 2003.
- 13 ГОСТ 464-79, «Заземления для стационарных установок проводной связи, радиорелейных станций, радиотрансляционных узлов и антенн систем коллективного приема телевидения».
- 14 РД 45.162-2001. Комплексы сетей сотовой и спутниковой подвижной связи общего пользования.
- 15 Абдул Базит. Расчет сетей LTE. – Хельсинский технологический университет, 2009.
- 16 Farooq Khan. LTE for 4G Mobile Broadband. Air Interface Technologies and Performance. – Cambridge University Press, 2009.
- 17 Harri Holma, Antti Toskala. LTE for UMTS. OFDMA and CS-FDMA Based Radio Access. – John Wiley Ltd, 2009.
- 18 Stefania Sesia. LTE. The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice. – John Wiley Ltd, 2009.
- 19 3GPP TS 36 104: «E-UTRA Base Station (BS) radio transmission and reception» (Release 9). April 2011.

20 www.cisco.com – официальный сайт в сети Интернет компании «Cisco Systems».

21 www.forum4g.ru – форум о 4G: WiMAX и LTE.

22 Нарымбетов А.М. Исследование характеристик радиодоступа на базе технологии LTE. Алматы.: Вестник АУЭС, 2013- 12 с.

Приложение А

Программа и алгоритм задержек сообщений при передаче речи

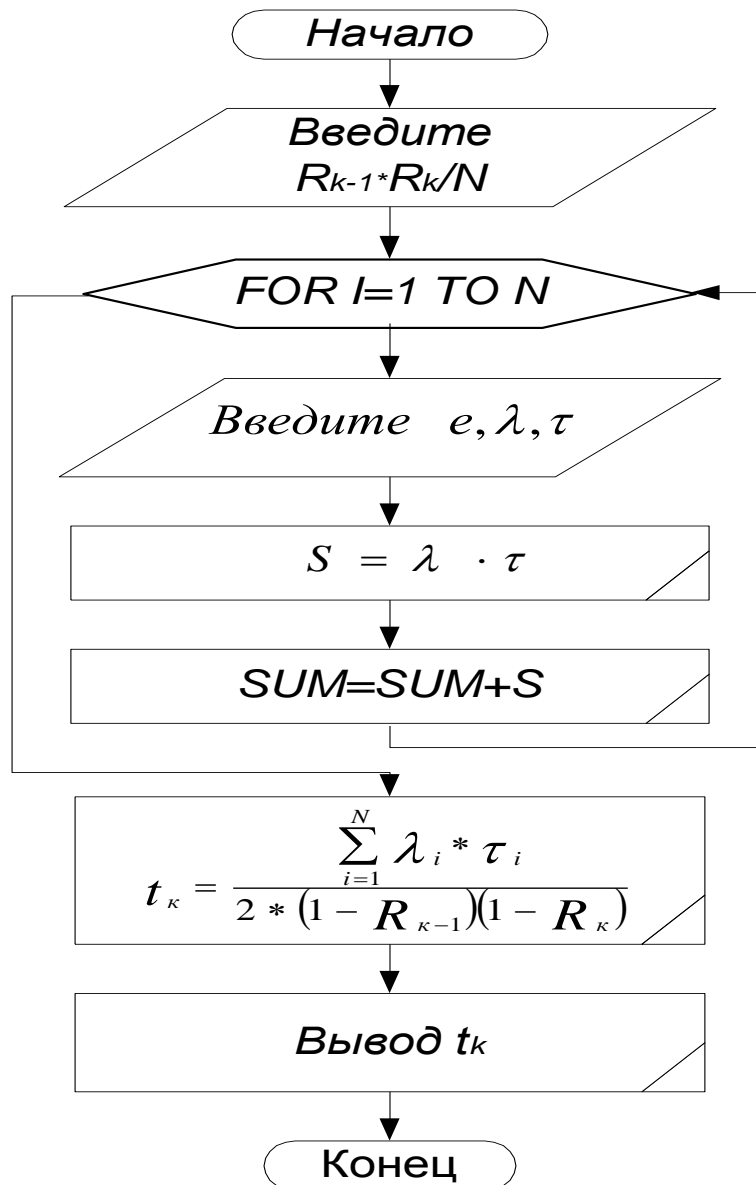


Рисунок А1 – Алгоритм задержек сообщения

В соответствии с данным алгоритмом разработана программа, представленная ниже.

```
10 CLS
20 SUM = 0
30 INPUT "ВВЕДИТЕ N"; N
40 INPUT "ВВЕДИТЕ Rk:"; RK1
```

```
50 INPUT "ВВЕДИТЕ Rk-1:"; RK2
```

```
60 FOR I = 1 TO N
```

Окончание приложения А

```
70 INPUT "ВВЕДИТЕ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТОКА:"; L
```

```
80 INPUT "ВВЕДИТЕ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ:"; T
```

```
90 S = L * T
```

```
100 SUM = SUM + S
```

```
110 NEXT I
```

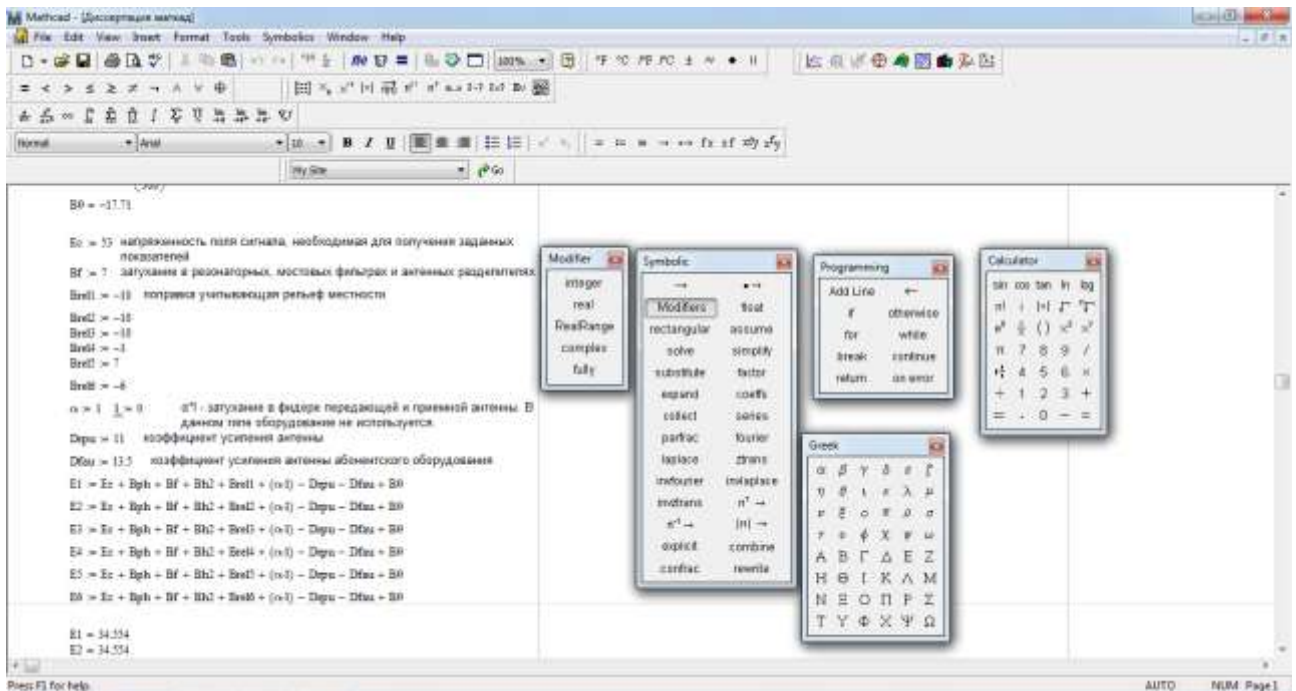
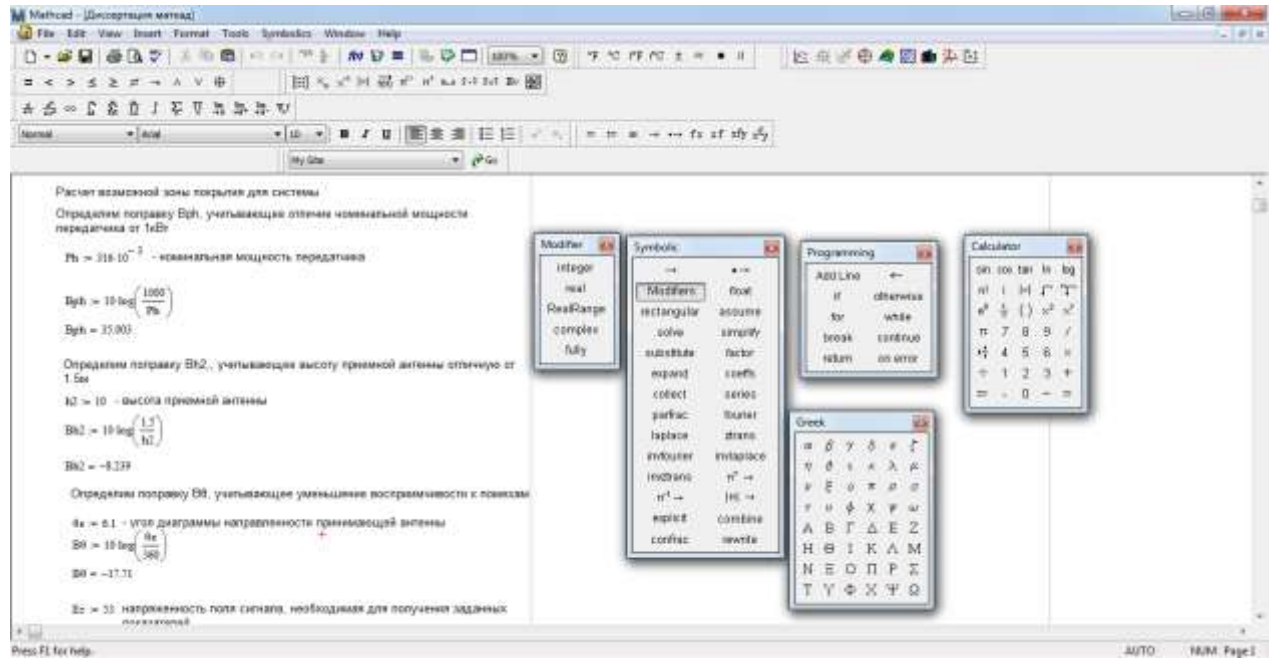
```
120 ТК = SUM / 2 * (1 - RK2) * (1 - RK1)
```

```
130 PRINT "Tk="; ТК
```

```
140 END
```

Приложение Б

Листинг программы MathCad



Окончание приложения Б

