

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

Кафедра Телекоммуникационных систем

Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
к.т.н., профессор Шагиахметов Д.Р.
(ученая степень, звание, Ф.И.О.)

« » _____ 2014 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка**

на тему: «Влияние помехоустойчивости широкополосных систем
беспроводного доступа IEEE 802.16 на качество передачи потокового
трафика»

Выполнил Овсянников В.А. _____ Группа МТСП-12-2
(Ф.И.О.) (подпись)

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

Рецензент к.т.н., доцент КазНТУ _____ Орынбет М.М.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

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

Нормоконтролер к.х.н., ст. преподаватель _____ Кудинова В.С.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы, 2014

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Радиотехники, телекоммуникации и связи

Специальность 6М071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

Кафедра Телекоммуникационных систем

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Овсянникову Владимиру Александровичу

Тема диссертации «Влияние помехоустойчивости широкополосных систем беспроводного доступа IEEE 802.16 на качество передачи потокового трафика»

утверждена Ученым советом института приказом №142 от «31.10» 2013 г.

Срок сдачи законченной диссертации « 25 » января 2014 г.

Цель исследования:

Оценка влияния помехоустойчивости систем широкополосного доступа WiMAX на качество передачи потокового трафика. Проанализированы параметры кодирования систем передачи с целью обеспечения заданного качества.

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

- 1 Обзор сетей беспроводного доступа;
- 2 Состояние проблемы передачи потоковых сервисов в широкополосных системах беспроводного доступа. Постановка задачи исследования ;
- 3 Оценка качества передачи потоковых данных в широкополосных системах беспроводного доступа.
- 4 Результаты экспериментальных исследований характеристик потокового трафика и разработка математических моделей функционирования систем беспроводного доступа.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) 1 Структурная схема архитектуры сети WiMAX

2 Графики зависимости вероятности пакетных ошибок от скорости передачи, размера пакетов и расстояния.

Рекомендуемая основная литература:

1 Шелухин О.И., Арсеньев А.В. Фоминский В.Ю. Алгоритм оценки вероятности пакетирования ошибок в каналах связи систем беспроводного доступа с подвижными объектами. Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса» №1(8) 2009.

2 Feamster N. and Balakrishnan H., Packet Loss Recovery for Streaming Video, 12th International Packet Video Workshop, Apr. 2002.

3 Артющенко В.М., Шелухин О.И., Афонин М.Ю. Цифровое сжатие видеoinформации и звука: Учебное пособие/ Под ред. В.М. Артющенко. - М.: "Дашков и Ко", 2003.

ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

| Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки предоставления научному руководителю | Примечание |
|---|--|------------|
| 1 Изучение характеристик стандарта IEEE 802.16. | 5.03.12 | Выполнил |
| 2. Сравнительный анализ методов оценки качества цифрового видео | 15.10.12 | |
| 3 Проведение экспериментальных измерений качества передачи трафика с учетом подвижности абонентов | 15.02.13 | Выполнил |
| 4 Расчет вероятности пакетирования ошибок в широкополосных системах беспроводного доступа. | 15.07.13 | Выполнил |
| 5 Алгоритм оценки вероятности пакетирования ошибок в каналах связи систем беспроводного доступа с подвижными объектами. | 15.10.13 | Выполнил |
| 6 Обобщение результатов. | 10.11.13 | Выполнил |

Дата выдачи задания 3 сентября 2012 г.

Заведующий кафедрой _____
подпись

Коньшин С. В.
(Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____
подпись

Жунусов К.Х.
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант _____

подпись

Овсянников В.А.
(Ф.И.О.)

Андатпа

Айтылмыш магистерлік диссертация, тасқынның трафиғының берілісінің сапасының зерттеу, сымсыз рұқсат алудың кең алқапты жүйелерінде арнаулы.

Шолу параметр тасқынның трафигінің және сапаның, толассыздықты сипаттаы жібере алатын қызмет.

Қатенің пакеттеуінің мүмкіндігінің сарапшылығының алгоритмдары арада байланыс жолдарында кең алқапты жүйенің, сымсыз рұқсат алу қозғалғыш нысандармен бас негізінде алынған эксперименталді қатенің тасқынының статистикалық мінездемесінің нәтижелерінің қарастырылған.

Аннотация

Данная магистерская диссертация посвящена исследованию качества передачи потокового трафика в широкополосных системах беспроводного доступа.

Проведен обзор параметров потокового трафика и качества, характеризующих непрерывность предоставляемых услуг.

Рассмотрены алгоритмы оценки вероятности пакетирования ошибок в каналах связи широкополосных систем беспроводного доступа с подвижными объектами на основе полученных экспериментально результатов статистических характеристик потоков ошибок.

Abstract

This master thesis deals with the quality of streaming traffic in broadband wireless access systems.

A review of streaming traffic parameters and quality that characterize the continuity of services provided.

The algorithms of estimating the probability of stacking errors in communication channels broadband wireless access systems with mobile objects on the basis of the experimental results of the statistical characteristics of flows errors.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 6 |
| 1 Постановка задачи..... | 7 |
| 2 Состояние проблемы передачи потоковых сервисов в широкополосных системах беспроводного доступа | 9 |
| 2.1 Характеристика стандарта IEEE 802.16..... | 9 |
| 2.2 Характеристика потокового трафика и параметры качества, характеризующие непрерывность предоставляемых услуг..... | 12 |
| 2.3 Обзор стандартов цифрового видео | 17 |
| 2.3.1 Общие понятия стандарта MPEG4..... | 18 |
| 2.4 Современные методы оценки качества декодирования потокового видео в беспроводных сетях | 19 |
| 2.4.1. Влияние вероятности потери пакета на качество декодирования видео. | 19 |
| 2.4.2 Оценка вероятности битовой ошибки..... | 21 |
| 2.4.3 Оценки качества воспроизведения видео. | 22 |
| 2.5 Сравнительный анализ методов оценки качества цифрового видео | 24 |
| 2.5.1 Объективные методы оценки качества. | 24 |
| 2.5.2 Метод непрерывной оценки качества. | 27 |
| 2.5.3 Метод вычисления субъективной оценки качества видео (SAMVIQ).28 | |
| 3 Исследование характеристик потокового трафика и разработка математических моделей функционирования систем беспроводного доступа.. | 30 |
| 3.1 Структура измерительного комплекса и параметры трафика..... | 30 |
| 4 Оценка качества передачи потоковых данных в широкополосных системах беспроводного доступа | 36 |
| 4.1 Результаты имитационного моделирования помехоустойчивости WiMAX в среде MathWorks Matlab и пакете визуального моделирования Simulink | 36 |
| 4.2 Влияние скорости передвижения терминала пользователя на помехоустойчивость | 40 |
| 4.3 Влияние на помехоустойчивость технологии MIMO | 41 |
| 5 Экспериментальная часть..... | 46 |
| Заключение | 51 |
| Перечень сокращений | 52 |
| Список литературы | 53 |

Введение

Развитие и рост мультимедийных технологий, с беспроводной средой передачи данных привлекают внимание все большей аудитории.

За несколько последних лет получили бурное развитие беспроводные технологии широкополосного доступа, являющиеся серьезной альтернативой сотовым системам связи 3G. Для организации единой широкополосной беспроводной сети (городские беспроводные сети (WMAN)), работающей на больших расстояниях, был разработан и предложен стандарт IEEE 802.16, названный WiMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access (международное взаимодействие для микроволнового доступа). WiMAX относится к технологии Wireless MAN, которая может соединяться с точками доступа стандарта IEEE 802.11 (Wi-Fi) и является серьезной альтернативой прокладке кабеля или линии DSL при организации последней мили. Благодаря своим преимуществам (возможность обеспечения широкополосной связи в условиях отсутствия прямой видимости, большая зона покрытия, высокое качество предоставляемых услуг, простота построения сети, а следовательно меньшие затраты, технология WiMAX считается наиболее перспективной при переходе к сетям четвертого поколения (4G). Благодаря использованию схемы модуляции OFDM системы WiMAX работают при отсутствии прямой видимости между антеннами базовой станции и абонентского устройства (по переотраженным сигналам). Видеопоток передается через сеть от приложения, установленного на сервере, к пользователю. Беспроводная среда, как правило, используется для передачи данных и видео контента.

При этом из-за ограниченности полосы пропускания приходится работать с видео с низким разрешением, и потеря одного пакета означает значительное ухудшение качества принятой информации. Кроме того, как правило, пользователи работают с приложением в реальном времени (поточковый трафик), когда невозможно осуществить повторную передачу данных.

Основным недостатком передачи видео по беспроводным сетям является отсутствие достаточной синхронизации между оригинальной последовательностью и декодированной на приемной стороне копией. Из-за агрессивной среды передачи пакеты данных могут претерпевать серьезные искажения или, вообще, теряться. Другим важным параметром характеризующим качество систем беспроводного доступа является степень интеграции услуг, что очень важно для передачи беспроводного видео в условиях ограниченности видео по размеру и по мощности мобильных устройств. На сегодняшний день не существует стандартных подходов к определению комплексных ошибок передачи.

1 Постановка задачи

В современных видео системах чаще всего используется кодек H.264/AVC - самый новый кодек, используемый для сжатия изображений, обеспечивающий лучшее качество при использовании меньшей полосы пропускания. В этом и состоит его отличие от кодеков H.263 и MPEG 4. Эта особенность кодека H.264 может быть использована в мобильных сетях передачи информации, то есть там, где имеется ограниченная полоса пропускания. Для передачи мультимедийных данных в распределенной окружающей среде необходимо учитывать ограничения, накладываемые на протоколы IP. Именно из-за этого появляются нежелательные эффекты, сказывающиеся на качестве обслуживания, что приводит к невозможности передавать высококачественную телевизионную картинку. С другой стороны, существует множество параметров, определяющих качество потокового видео (скорость передачи данных, коэффициент ошибок, дрожание фаз (джиттер)). В работе оценивается качество видео, переданного через мобильную сеть высокоскоростного пакетного доступа, который широко применяется и характеризуется более широкой полосой пропускания и более низкими временными задержками.

Для проведения исследований использовались методы теории вероятности, математической статистики, случайных процессов, теории телетрафика, теории массового обслуживания, а также методы имитационного моделирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается результатами экспериментальных измерений трафика, а также статистическим анализом характеристик телекоммуникационного трафика в системах широкополосного доступа, результатами имитационного моделирования, которые не противоречат известным результатам, а также длительностью экспериментальных исследований, повторяемостью и контролируемостью.

Научная новизна:

а) предложен алгоритм количественной оценки вероятности пакетирования n или большего количества ошибок в блоке данных длиной p бит, которая может быть определена с помощью элементов матрицы переходных вероятностей Марковской модели, найденных из экспериментальных статистических характеристик потока ошибок в каналах широкополосного. Исследования показали, что средняя длина пакетных ошибок составляет от 2 до 4 пакетов для большинства анализируемых расстояний;

б) разработаны и исследованы алгоритмы объективной оценки качества восприятия потокового видео стандарта H.264/AVC как в условиях одиночных битовых ошибок, так и при пакетировании ошибок в каналах беспроводного широкополосного доступа;

в) доказано, что при потоковом видео потеря даже очень малого числа пакетов (около 1%) приводит к появлению непреодолимых проблем при

декодировании, а увеличение «битрейта» и способа кодирования практически не влияет на качество воспроизведения видео.

Предложенный алгоритм оценки помехоустойчивости систем беспроводного доступа WiMAX позволяет впервые одновременно количественно оценивать качество передачи потокового трафика в условиях пакетирования ошибок, возникающих из-за многолучевого распространения.

На основе программной реализации алгоритма в среде МайАБ БтиНпк создана система оценки помехоустойчивости видео и мультимедийной информации на базе комплексного учета основных особенностей стандарта IEEE 802.16. Внедрение разработанных алгоритмов объективной оценки качества восприятия потокового видео стандарта H.264/AVC как в условиях одиночных битовых ошибок, так и при пакетировании ошибок в каналах беспроводного широкополосного доступа позволяет впервые производить количественную оценку эффективности декодирования видео в зависимости от информационных и индивидуальных характеристик кодеров в реальном масштабе времени.

Необходимым условием количественной оценки качества передачи потокового трафика в системах беспроводного широкополосного доступа WiMAX является определение вероятности пакетирования ошибок, вызванного в основном подвижностью абонентов. Найденные вероятности позволяют обосновать выбор глубины перемежения показавшего, что с увеличением скорости перемещения эффективность перемежения падает. Необходимым и достаточным условием удовлетворительного качества передачи потокового видео является потеря числа пакетов не более 1 %, и битовая ошибка BER < $3 \cdot 10^{-5}$. При невыполнении этих условий при декодировании увеличение «битрейта» и способа кодирования практически не влияет на качество воспроизведения видео. Наличие фонового FTP трафика приводит к дополнительному ухудшению объективного качества, увеличивая процент потерянных пакетов

Качество объективных оценок потокового видео зависит от информационных и индивидуальных особенностей характеристик кодера H.264/AVC и приводит к дополнительному группированию ошибок, влияние которых на декодированное видео значительно больше битовых ошибок в каналах беспроводного доступа.

2 Состояние проблемы передачи потоковых сервисов в широкополосных системах беспроводного доступа

2.1 Характеристика стандарта IEEE 802.16

Начиная с 90-х годов, стали появляться компании-операторы услуг широкополосного доступа к сетям передачи данных общего пользования. Однако, даже в настоящее время проникновение услуг широкополосного доступа к потребителям явно не достаточное. Вызвано это положение, прежде всего, тем, что проводные средства, такие как xDSL, и кабельные сети имеют ограниченные возможности из-за дороговизны и трудности доставки услуг к потребителю, а изготовители оборудования радиодоступа пока не готовы к производству систем по общим стандартам.

В современных условиях, где основополагающей, в основном, является доставка мультимедийного трафика, потребовалась корректировка главных принципов, заложенных в беспроводные системы на предыдущих этапах. Так на уровне передачи сигналов первостепенное значение приобрело оптимальное использование спектрального ресурса радиоканала при любых соотношениях «скорость-помехоустойчивость», а на уровне протоколов стало необходимым обеспечивать заданный уровень качества обслуживания (QoS) любому абоненту сети.

Разработанный IEEE стандарт IEEE 802.16-2004 представляет собой рассчитанную на внедрение в городских распределенных (региональных) беспроводных сетях (WirelessMAN) технологию беспроводного широкополосного доступа операторского класса.

На рисунке 2.1 представлена диаграмма развития стандарта за последние 5 лет с указанием наиболее приоритетных направлений развития технологии на ближайшее будущее.

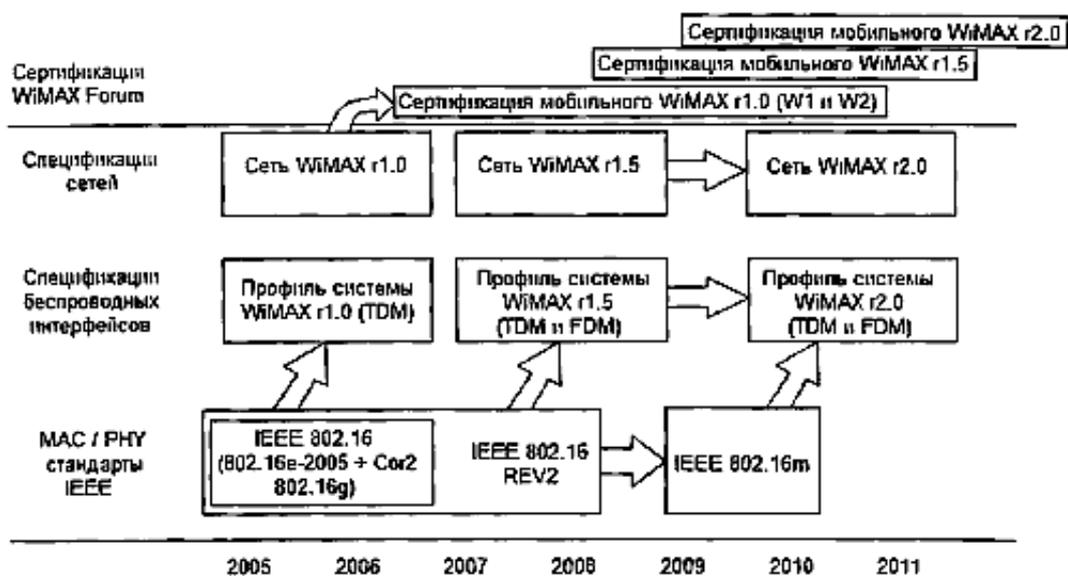


Рисунок 2.1 – Диаграмма развития стандарта IEEE 802.16

На диаграмме можно видеть, что основной целью WiMAX Forum на ближайшие несколько лет является развитие спецификаций мобильного WiMAX и, в частности, разработка спецификации стандарта 802.16t - наиболее перспективного из серии стандартов 802.16. WiMAX, как и другие технологии связи, является естественным продолжением развития технологий беспроводной связи.

Диаграмма, приведенная на рисунке 1.2, иллюстрирует эволюцию беспроводных сетей передачи данных на пути к 4G-сетям, являющимся на сегодняшний день наиболее перспективными разработками.

Безусловно, что с появлением Wi-Fi (IEEE 802.11) технологии стали появляться множества точек доступа к магистральным проводным сетям по беспроводному интерфейсу. Со временем такие сети обзавелись собственной инфраструктурой, и в настоящее время практически любой отель, аэропорт или целый микрорайон обладает покрытием Wi-Fi доступа на всей своей территории. Однако изначально имевшиеся в стандарте ограничения по скорости обмена данными, радиусу действия, количеству каналов и стоимости развертывания инфраструктуры пока не позволили стать сетям Wi-Fi тотальной угрозой сотовым сетям с одной стороны и проводным сетям с другой. Несмотря на значительные преимущества и введение новых, более современных версий стандарта ограничения Wi-Fi будут сняты только с помощью новых магистральных стандартов обмена данными вроде WiMAX.

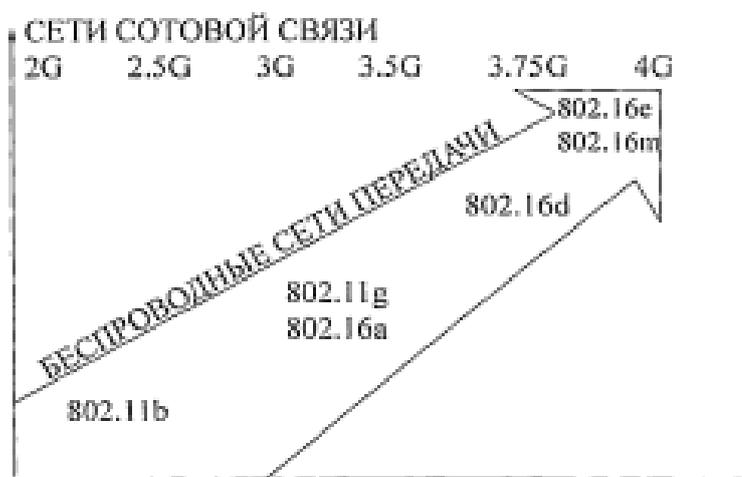


Рисунок 2.2 – Развитие беспроводных сетей передачи данных

В секторе сотовых сетей основным конкурентом WiMAX остаются такие технологии, как универсальная система мобильной связи UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) и EV-DO (EVolution - Data Optimized), основанные на кодовом разделении каналов CDMA. Сравнительные характеристики указанных технологий представлены в таблице 2.1.

Известно, что непосредственной доставкой потоков данных между базовой станцией и абонентскими станциями занимается физический уровень

стандарта IEEE 802.16. Функции же, связанные с формированием структур этих данных, а также управлением работой системы IEEE 802.16, реализуются на MAC-уровне. Оборудование стандарта IEEE 802.16 призвано формировать транспортную среду для различных приложений, поэтому первой задачей, решаемой в IEEE 802.16, является реализация механизма поддержки разнообразных сервисов верхнего уровня. Разработчики стандарта стремились создать единый для всех приложений протокол MAC-уровня, независимо от особенностей физического канала.

Т а б л и ц а 2.1 – Сравнительные характеристики указанных технологий

| | Wi-Fi | WiMAX | | UMTS | EV-DO |
|---------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---|
| Стандарт | IEEE 802.11 | IEEE 802.16e | IEEE 802.16 | IMT2000 | 1MT-MC 450 |
| Ширина канала | 20 МГц фикс. | < 20МГц перем. | <28МГц перем. | 5 МГц фикс. | 1.25 МГц фикс. |
| Спектр частот | 2.4/5.2 ГГц | 2-11 ГГц | 10-66 ГГц | ~2 ГГц | 450 МГц |
| Скорость передачи | 2/54 Мбит/с | 70 Мбит/с | 240 Мбит/с | 1/14 Мбит/с | 2.4/3.1 Мбит/с |
| Дальность | 100 м | 1-7 км | 12-15км | 50 км | 70 км |
| Мультиплексирование | TDM | FDM/TDM | FDM/TDM | FDM | ТОМА |
| Метод передачи | SS OFDM | OFDM OFDMA | SC | WCDMA | WCDMA |
| Мобильность | Средняя | Высокая | Нет | Высокая | Высокая |
| Преимущества | Пропускная способность и стоимость | Пропускная способность и дальность | | Мобильность и дальность | Мобильность и дальность |
| Недостатки | Короткая дальность | Интерференция | | Пропускная способность и стоимость | Стоимость и региональность оборудования |

Стандарт 802.16 предусматривает пять режимов работы (таблица 2.2).

В одном канале могут работать (не одновременно) сотни различных терминалов, при этом пользователям задействованы самые разные сервисы — потоки голоса и данных, мультимедиа потоки с временным разделением, соединения по IP протоколу, пакетная передача речи через IP (VoIP) и прочие. При этом качество услуг (QoS) каждого отдельного сервиса не должно изменяться при работе через сети IEEE 802.16.

Т а б л и ц а 2.2 – Основные режимы в стандарте IEEE 802.16-2004

| Режим | Частотный диапазон | Опции | Метод мультиплексирования |
|-------------------|--------------------|----------------------|---------------------------|
| WirelessMAN-SC | 10-66 ГГц | | TDM/FDM |
| WirelessMAN-SCa | < 11 ГГц | AAS/ARQ/STC/256-QAM | TDM/FDM |
| WirelessMAN-OFDM | <11 ГГц | AAS/ARQ/STC/Mesh | TDM/FDM |
| WirelessMAN-OFDMA | <11 ГГц | AAS/ARQ/STC | TDM/FDM |
| WirelessHUMAN | <11 ГГц | DFS/AAS/ARQ/Mesh/STC | TDM |

2.2 Характеристика потокового трафика и параметры качества, характеризующие непрерывность предоставляемых услуг

Потоковый трафик - тип трафика, для которого характерен просмотр и (или) прослушивание информации по мере ее поступления в пользовательское (оконечное) оборудование.

Трафик в современных вычислительных сетях можно поделить на две больших группы - эластичный трафик, который генерируют традиционные сервисы, такие как электронная почта, WWW или FTP, и трафик реального времени, который генерируют мультимедийные сервисы, такие как IP-телефония или видеоконференции. Доля трафика реального времени постепенно увеличивается, что объясняется ростом интереса к сервисам, позволяющим передавать по вычислительным сетям звук и видеоизображения высокого качества (с высокой скоростью битового потока, с большим разрешением), таким как MoD (Music-on-Demand), VoD (Video-on-Demand) и IPTV (IP-Television).

Передача потоковых сервисов (аудио и видео) по различным средам (системы беспроводного доступа, Интернет) - становится все более популярным. Это стремительное распространение определяет новую сложную задачу по поддержанию качества обслуживания для каждого потока. С другой стороны, предвидятся новые мобильные системы, предлагающие беспроводные услуги для широкого разнообразия переносных терминалов, начиная с сотовых телефонов и персональных цифровых помощников (PDAs) и заканчивая маленькими портативными компьютерами. Все эти устройства являются разнородными. Они имеют разную вычислительную мощь, дисплей, память и возможную скорость передачи данных. Таким образом, скорость декодируемых данных и разрешение контента должны быть адаптированы под окружающую сеть и дисплей устройства (терминала). Это качество, необходимое для передачи огромного объема информации по гетерогенным

сетям, заодно должно находить применение там, где вышеупомянутые терминалы не способны отобразить полное разрешение или все свойства изображения. Несмотря на переход к высоким скоростям зачастую возникают перегрузки при попытках запустить в эксплуатацию ресурсоемкие сервисы наподобие IPTV, доступные множеству пользователей. В результате качество услуги оказывается невысоким, что особенно критично для видеотрансляций - замечено, что даже незначительные перебои с картинкой на экране или рассинхронизацией звуковой и видеодорожек вызывают негативную реакцию зрителей.

Однако проблема кроется не в недостаточной скорости сетей, а в характеристиках самого трафика, точнее в особенностях взаимодействия эластичного трафика и потоков данных реального времени.

Характерной особенностью определения показателей QoS для услуг передачи данных в широкополосных сетях радиодоступа является то, что учитываются классы данных (трафика), определенные стандартом ETSI T8 123107: диалоговый, потоковый, интерактивный и фоновый. Главным фактором различия между этими классами является их чувствительность к временной задержке передаваемых в сети потоков данных. Влияние задержки пакетов в элементах сети по времени проявляется в возможности (невозможности) восприятия человеком того или иного фрагмента сообщения, к примеру, цельного (без «разрывов») аудио- или видео-фрагмента. Так, по субъективным оценкам, для указанных сообщений максимальная величина задержки пакетов от отправителя до получателя не должна превышать 400 мс. Для некоторых видов услуг ограничение задержки является жестким условием, ибо невозможность обеспечить необходимую задержку пакетов приводит к неприемлемому качеству этих услуг.

Диалоговый (речевой) класс трафика. Это единственный класс, где задержка строго определяется восприятием человека и требуется передача пакетов в реальном масштабе времени (с предельно малой задержкой). Данный класс трафика соответствует голосовым услугам и видео-телефонии.

Потоковый класс трафика. Данные обрабатываются как устойчивый и непрерывный поток. Этот класс соответствует приему/передаче Web-информации и приему/передаче информации по запросу. Такого рода приложения (методы передачи) являются асимметричными и поэтому способны выдерживать более длительную задержку, чем симметричные диалоговые системы, а также допускают значительный разброс и изменения значений задержки.

Интерактивный класс трафика - тип трафика, для которого характерно непосредственное взаимодействие (диалог) пользователей услугой связи или пользовательского (оконечного) оборудования. Этот класс трафика используется для предоставления услуг, при которых конечный пользователь (человек или машина) в режиме диалога в реальном масштабе времени запрашивает данные от удаленного источника (например, сервера). Примерами взаимодействия человека с удаленным источником могут служить

просмотр Web-страниц, поиск информации в базе данных, доступ к серверу; взаимодействия машины с удаленным источником - опрос данных измерений и автоматические запросы, посылаемые в базу данных (телеметрические системы). Интерактивный трафик представляет собой классическую схему передачи данных, которая в общих чертах характеризуется формой «запрос-ответ конечного пользователя». Одним из ключевых параметров является задержка, связанная с подтверждением приема данных. К таким услугам можно отнести: услуги на основе определения местоположения абонента, компьютерные игры. Однако, в зависимости от характера игры (т.е., на сколько активно ведется передача данных) эта услуга может быть отнесена по степени приемлемой задержки к диалоговому классу (передача данных в реальном времени).

Фоновый класс трафика. Трафик данного класса (доставка электронной почты, SMS, загрузка баз данных и т.п.) может передаваться с задержкой, поскольку такая информация не требует немедленного выполнения каких-либо действий. Задержка при этом может составлять секунды, десятки секунд и даже минуты. На начальном этапе коммерческой эксплуатации сетей UMTS трафик диалогового и потокового классов будет передаваться в реальном масштабе времени в режиме коммутации каналов. В таблице 2.3 приведены основные характеристики обмена данными в сетях 3G для описанных классов трафика. С точки зрения показателей качества предоставления услуг, каждый из перечисленных классов имеет свои специфические особенности. В таблице 2.4 и 2.5 приведены основные количественные показатели для некоторых видов услуг с трафиком потокового и интерактивного классов соответственно.

Как видно из этих таблиц, основными характеристиками трафика потокового и интерактивного классов являются задержка пакетов данных и вероятность ошибки фрейма (FER), характеризующая качество принимаемых данных.

Т а б л и ц а 2.3 – Количественные показатели для услуг с трафиком потокового и интерактивного классов

| Вид услуги | Приложение | Степень симметрии | Скорость передачи данных (кбит/с) | Основные характеристики и их показатели | | |
|----------------|---|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|---------------|
| | | | | Односторонняя задержка (мс) | Изменение задержки (мс) | Потеря данных |
| Передача аудио | Высококачественное прямое воспроизведение звука | В основном, односторонняя | 16-128 | <150 | «1 | <3% FER |

Продолжение таблицы 2.3

| Вид услуги | Приложение | Степень симметрии | Скорость передачи данных (кбит/с) | Основные характеристики и их показатели | | |
|-----------------|--|---------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------|---------------|
| | | | | Односторонняя задержка (мс) | Изменение задержки (мс) | Потеря данных |
| Передача видео | Высококачественное прямое воспроизведение видеоизображений | Односторонняя | 32-384 | < 150 | | < 1% FER |
| Передача данных | Преобразование массивов данных/поиск | В основном, односторонняя | | <250 | Не применяется | 0 |
| Передача данных | Изображение | Односторонняя | | <250 | Не Применяется | 0 |
| Передача данных | Телеметрия - мониторинг | Односторонняя | <28,8 | <250 | Не Применяется | 0 |

Т а б л и ц а 2.4 – Количественные показатели для услуг передачи потоковых речи и данных

| Вид услуги | Приложение | Степень симметрии | Основные характеристики и их показатели | | |
|-----------------|--|--------------------------|---|---------------|---------------|
| | | | Односторонняя задержка | Задержка (мс) | Потеря данных |
| Передача речи | Голосовые сообщения | В основном односторонняя | < 1с для воспроизведения < 2 с для записи | < 1 | < 3% FER |
| Передача данных | Web-поиск Web-просмотр | В основном односторонняя | Предпочтительная < 2 с/стр. Допустимая < 4 с | Нет | 0 |
| Передача данных | Транзакции с высоким приоритетом, электронная торговля | Двухсторонняя | Предпочтительная < 2 с Допустимая < 4 с | Нет | 0 |

| | | | | | |
|-----------------|-------------------|--------------------------|--|-----|---|
| Передача данных | Электронная почта | В основном односторонняя | Предпочтительная < 2 с Допустимая < 4 с | Нет | 0 |
|-----------------|-------------------|--------------------------|--|-----|---|

Т а б л и ц а 2.5 – Технические нормы на среднемесячные показатели функционирования сети доступа, подлежащие контролю

| Наименование показателя | Интерактивный | Интерактивный при использовании спутниковой линии связи | Потоковый | Трафик передачи данных, за исключением интерактивного и потокового трафика |
|--|--------------------|---|--------------------|--|
| Средняя задержка передачи пакетов информации, (мс) | не более 100 | не более 400 | не более 400 | Не более 1000 |
| Отклонение от среднего значения задержки передачи пакетов информации, (мс) | не более 50 | не более 50 | не более 50 | |
| Коэффициент ошибок в пакетах информации | не более 10^{-3} | не более 10^{-3} | не более 10^{-3} | Не более 10^{-3} |
| Коэффициент потери пакетов информации | не более 10^{-4} | не более 10^{-4} | не более 10^{-4} | Не более 10^{-4} |

Качество данных может быть оценено также на основании информации о надежности «мягкого фрейма» (мягкого решения декодера). Такой информацией может быть:

- вероятность ошибок элементов сообщения (ВЕЯ - вероятность ошибки на бит), вычисленная до декодера канала - ВЕЯ в физическом канале;
- мягкая (текущая) информация из декодера Витерби сверточного кода;
- мягкая информация от турбодекодера, например, отношение E_b/N_0 в канале.

При этом использование того или иного способа определения качества принимаемых данных имеет особенности. Качество передачи данных может

быть оценено любым из рассмотренных трех методов, однако, по-видимому, наиболее эффективным будет комплексный подход. Сущность комплексного подхода будет заключаться в использовании информации об ошибках, получаемых от декодера, и данных о качестве приема единичных элементов принимаемого сигнала (или отношения сигнал/шум).

Мультимедийный поток. Поточковые технологии выполняют передачу информационных средств с помощью сетей от сервера к пользователю в режиме реального времени. Средства не загружаются на жёсткий диск просматривающего. Средства просматриваются, пока клиент принимает их (бывает, что использование буфера игнорируется). Если клиент захочет просмотреть средства снова, то потоковый процесс повторяется.

Потоковая система «от одного конца к другому» требует наличия некоторого программного обеспечения, потокового сервера и проигрывателя у клиента. Клипы производятся специальными программами, преобразующими аудио, видео и анимацию в формат MPEG-4 для потоковой трансляции. Поточковые серверы, например сервер (компании Apple) или RealServer (компании RealNetworks) могут использоваться для передачи медиа-клипов клиентам, использующим MP4Player, RealPlayer или QuickTime.

2.3 Обзор стандартов цифрового видео

Как известно [1], аналоговый видеосигнал, создаваемый аналоговой видеокамерой, состоит из последовательности видеокадров. Видеокадры генерируются с фиксированной кадровой скоростью (например, 30 кадров/с, в формате NTSC, National Television Standards Committee). При создании каждого кадра камера сканирует изображение построчно (455 строк, согласно NTSC). Для получения цифрового видео сигнала аналоговый сигнал передают цифровому преобразователю, который формирует выборки из аналогового сигнала и квантует его.

Каждый отсчет выборки соответствует одному элементу картинки, пикселю (picture element, pel). Наиболее распространены следующие форматы кадров: Общий промежуточный формат (Common Intermediate Format, CIF) с разрешением 352 x 288 пикселей (т.е. 352 pels по горизонтали и 288 pels по вертикали), Входной формат источника (Source Intermediate Format, SIF; 352 x 240 pels), и Четверть-CIF (QCIF, 176 x 144 pels). Во всех трёх форматах каждый видеокадр разделяется на три блока. Это блок яркости (Y), и две цветовые составляющие: тон (U) и интенсивность (Насыщенность) (V). Так как глаз человека менее восприимчив к цвету, нежели к яркости, цветовые составляющие задаются с более низким разрешением. В основном, каждая цветовая компонента по сравнению с яркостной составляющей обладает половинным разрешением в обоих направлениях по вертикали и горизонтали (Это называется цветовой подвыборкой 4:1:1). В формате QCIF, например, это выглядит так: 176 x 144 разрешение по яркости, 88×72 по тону и 88×72 по насыщенности для каждого видеокадра, при использовании цветовой

подвыборки 4:1:1. В заключении, каждый отсчет квантуется; обычно, 8 битами на отсчет. В стандарте кодирования MPEG4 применяется дискретное косинусоидальное преобразование (DCT), предназначенное для устранения пространственной избыточности в отдельно взятом кадре. Каждый видеокادر делится на макроблоки (МВ). Каждый макроблок состоит яркостной составляющей размером 16x16 отсчетов и двух соответствующих ей цветowych компонент размером 8x8. Яркостная составляющая 16x16 делится еще на 4 блока размером 8x8 отсчетов каждый. Преобразование DCT применяется к каждому из 6 блоков в макроблоке (т.е., четыре блока яркости и два цветности). Для каждого блока полученные в результате DCT коэффициенты квантуются, используя матрицу квантования 8 x 8, в которой записаны величины шагов квантования для каждого DCT коэффициента. Матрица квантования получается при умножении базовой матрицы на параметр квантования. Этот параметр, как правило, используется при настройке видео кодека. При больших значениях этого параметра квантование происходит более грубо, что приводит к более низкому качеству, а также к меньшему размеру (в битах) кодируемого кадра. Квантованные DCT коэффициенты в конце концов кодируются неравномерным кодом для достижения более компактного представления. Оба стандарта MPEG-4 и H.263 снабжены алгоритмом кодирования с предсказанием, снижающим временную избыточность, которая является следствием взаимной зависимости смежных видеокладров во времени. Исходный макроблок подвергается либо внутрикадровому сжатию (кодированию) (т.е., без какой-либо ссылки на другой кадр), либо межкадровому (т.е., со ссылкой на предшествующий или последующий кадр). При межкадровом кодировании данного макроблока, поиск движения сопровождается отысканием наилучшего совпадения отдельно взятого участка 16x16 предыдущего (последующего) кадра с данным МВ. Разность между рассматриваемым макроблоком и областью наилучшего совпадения преобразовывают при помощи DCT, квантуют, кодируют неравномерным кодом и затем передают в одном направлении с вектором движения к месту совпадения.

2.3.1 Общие понятия стандарта MPEG4.

MPEG-4 (ISO 14496) является стандартом ISO/IEC, разработанным группой экспертов по движущимся изображениям, MPEG (Moving Picture Experts Group). Первая версия этого стандарта была закончена в октябре 1998 и стала международным стандартом в начале 1999. Хотя MPEG-4 описан как отдельный стандарт, он является набором форматов сжатия/восстановления и совокупностью потоковых технологий, которые направлены на необходимость распределения огромного богатства интерактивных медиаресурсов по узко- и широкополосным сетям. Революция в области коммуникаций, вызванная Интернетом, появление беспроводных устройств, а также обещание создать Интернет следующего поколения подчеркивают важность наличия общего международного стандарта, который описывает

общемировой способ передачи больших объемов информации. Конечная цель MPEG-4 проложить путь в будущем к единообразному, высококачественному потоковому стандарту, который бы заменил множество используемых сегодня частных технологий.

MPEG-4 был разработан, чтобы преодолеть следующие проблемы:

– совместимость (функциональная совместимость). Стандарт не специализируется на отдельной платформе, а разрабатывается сразу для всех платформ;

– транспортная независимость. MPEG-4 оставляет выбор транспортного механизма провайдерам услуг. Это позволяет MPEG-4 быть использованным в широком спектре сетей разной конфигурации. В следующей работе мы обратимся к некоторым адаптивным методам передачи видеопотоков, главным образом, в беспроводных сетях.

2.4 Современные методы оценки качества декодирования потокового видео в беспроводных сетях

При передаче видео по каналам связи важно обеспечить пользователю необходимый уровень воспринимаемого качества, что обеспечивается выбором сети и параметров сжатия.

2.4.1. Влияние вероятности потери пакета на качество декодирования видео.

Рассмотрим статистические параметры, характеризующие качество декодируемых видеопоследовательностей, которые могут быть оценены по результатам измерений. В частности, возможно вычисление отношения между числом потерянных пакетов и полученных кадров J . При подсчете числа кадров J можно предположить, что если качество кадра (например, PSNR, Peak-Signal-to- Noise Ratio) будет ниже определенного порогового значения, то кадр считается «потерянным» [8]. В результате число полученных кадров J можно выразить как $J_0(1 - \varphi)$, где φ - число «потерянных» кадров; J_0 — число кадров в исходном битовом потоке в кадрах в секунду (например, 30 кадр/с).

Число потерянных кадров φ является суммой условных вероятностей

$$\varphi = \sum_i P(J_i)P(\bar{F} | J_i), \quad (2.1)$$

где i - тип кадра (I, P и B);

\bar{F} - событие, которое характеризует «потерю» кадра при снижении качества ниже определенного порога;

J_i - событие, характеризующее передачу кадра i -го типа;

$P(j_i)$ - априорная вероятность, которая может определяться для каждого типа кадров непосредственно из битового потока данных.

Можно оценить условную вероятность $P(F|j_i)$ для каждого типа кадров j_i . Если предположить, что при потере одного пакета теряется и кадр (или эффект потери одного пакета заметен на следующих кадрах), то кадр считается пустым или «бесполезным». В этом случае условная вероятность $P(F|I)$ является случайной переменной Бернулли, прямо пропорциональной числу успешно доставленных видеок кадров. Аналогично можно определить условную вероятность $P(F|I)$ для каждого I-кадра. Условная вероятность $P(F|I)$ является вероятностью того, что кадр I-го типа не будет успешно декодирован в приемнике и оценивается по формуле

$$P(\bar{F}|I) = 1 - (1-p)^{S_i}, \quad (2.2)$$

где S_i - среднее число пакетов в I-кадре.

Условные вероятности для P- и B-кадров немного сложнее и требуют учета межкадровой зависимости.

Каждый P-кадр зависит от предшествующих I- или P-кадров, и каждый B- кадр зависит от двух окружающих (соседних) кадров (ближайшие два I- или P- кадра). Таким образом, успешное декодирование P-кадров зависит от всех предшествующих I- или P-кадров, а успешное декодирование B-кадров зависит от успешного декодирования всех окружающих кадров, что подразумевает успешное декодирование предшествующих и следующих I- или P-кадров. Эти зависимости выражаются в следующем виде

$$P(\bar{F}|P) = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} (1 - (1-p)^{S_i + kS_p}), \quad (2.3)$$

$$P(\bar{F}|B) \leq \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} (1 - (1-p)^{S_i + (k+1)S_p + S_B}), \quad (2.4)$$

где S_i - среднее число пакетов в P-кадре;

N_p - число P-кадров в GOP;

S_B - число пакетов в B-кадре. Эти выражения можно упростить, переписав их в виде

$$P(\bar{F}|P) = 1 - \frac{(1-p)^{S_i}}{N_p(1-(1-p)^{S_p})} (1-(1-p)^{S_p N_p}) \quad (2.5)$$

(2.6)

Используя (2.2), (2.5), и (2.6), уравнения (2.1), можно получить

$$P(\bar{F}|B) \leq 1 - \frac{(1-p)^{S_i + S_p + S_B}}{N_p(1-(1-p)^{S_p})} (1-(1-p)^{S_p N_p})$$

выражение для ϕ , а затем, имея значения N_p, S_I, S_p, S_b и \int_0 , можно оценить и число полученных кадров $\int = \int_0(1 - \phi)$.

2.4.2 Оценка вероятности битовой ошибки.

Источником искажений и ошибок между кодером и декодером при передаче видео является беспроводной канал. Наиболее распространенной моделью канала является «аддитивный белый Гауссовский шум» или AWGN (от англ. Additive White Gaussian Noise). Принятый в канале AWGN сигнал может быть представлен как

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad (2.7)$$

где $s(t)$ - переданный сигнал;

$n(t)$ - шумовой сигнал, имеющий среднее значение 0 и спектральную плотность мощности шума $N_0/2$, Вт/Гц [14].

Так, при использовании в системах радиодоступа QAM-модуляции вероятность битовой ошибки n -го подканала может быть выражена следующим образом [9]

$$P_{b,n} \cong \frac{2(\sqrt{M_n} - 1)}{\sqrt{M_n} \log_2 M_n} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{P_n 3 |H_n|^2}{2(M_n - 1) \sigma_z^2}} = \frac{2(\sqrt{M_n} - 1)}{\sqrt{M_n} \log_2 M_n} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E_s 3 \varepsilon_n |H_n|^2 \eta_D}{N_0 2(M_n - 1)}}, \quad (2.8)$$

где M_n - число поднесущих;

H_n - функция преобразования n -то субканала (коэффициент передачи субканала);

E_s/N_0 - отношение сигнал/шум передаваемого (OFDM) символа;

$\varepsilon_n = P_n/P_T$ - доля мощности для n -го субканала.

В реальных модемах число поднесущих $M_n = M$ ограничено и постоянно (например, $M = 2, 4, 16, 64$) [10].

Как правило, модель AWGN не вполне соответствует реальным условиям передачи в беспроводных каналах, поскольку передаваемый сигнал подвержен «замираниям». Замирания представляют собой флуктуации мгновенных значений напряженности сигнала в месте расположения приемника из-за многолучевости трасс распространения при прохождении сигнала от передатчика.

Основными факторами, влияющими на сигнал, распространяющийся в беспроводной среде, являются отражение, дифракция и рассеивание. Также в модели беспроводного канала должны учитываться следующие факторы [11]:

– задержка при многолучевом распространении; характеристики затухания;

– потери при передаче; доплеровское распространение; помехи со-канала (интерференция).

При имитации беспроводного канала должны рассматриваться все перечисленные факторы, поскольку они являются естественными процессами, происходящими в канале.

2.4.3 Оценки качества воспроизведения видео.

Известно множество методов, используемых для вычисления объективного качества изображения или видео, которые не всегда совпадают с чувственной оценкой зрителей. В связи с этим были введены субъективные показатели качества видео, позволяющие классифицировать восприятие человека. Измерение качества воспринимаемого видео производится с использованием методов субъективных шкал. Условием для таких измерений является наличие смысла, т.е. то, что существует связь между физическими характеристиками «воздействия», в данном случае видеопоследовательности, представляемой субъекту при тесте, и величиной и природой ощущения, вызванного воздействием. Итоговый выбор одного из этих методов для определенного приложения зависит от нескольких факторов, таких как содержания, цели и где в процессе выполнения теста он выполняется [1]. Наиболее популярными являются следующие методы [12]:

а) двойная шкала деградации DSIS (от англ. Double Stimulus Impairment Scale);

б) шкала непрерывной оценки качества DSCQS (от англ. Double Stimulus Continuous Quality Scale);

в) оценка видео с использованием сравнительной шкалы SCACJ (от англ. Stimulus Comparison Adjectival Categorical Judgement);

г) субъективный метод оценки качества видео SAMVIQ (от англ. Subjective Assessment Method for Video Quality evaluation);

д) непрерывная оценка качества MSUCQE (от англ. MSU Continuous Quality Evaluation).

Традиционно субъективное качество видео определяется путем экспертной оценки и подсчетом среднего балла MOS (от англ. Mean Opinion Score) от 1 до 5 (шкала ITU), где 1 - наихудшее, а 5 - наилучшее полученное качество видео [12]. Этот подход, однако, требует определенных экспертных навыков и поэтому не используется в автоматизированных системах.

Для проведения субъективного тестирования, как правило, необходимо следующее [13]:

– выбрать видеопоследовательности для тестирования (обычно используется видео около 8 - 10 с, чтобы предотвратить рассеивание внимания экспертов и сократить общее время экспериментов);

– выбрать настройки сравниваемых систем обработки видео;

– выбрать метод тестирования;

– пригласить достаточное число экспертов (рекомендуется не менее 15);

– получить окончательные оценки, основываясь на мнении экспертов.

Качество видео может контролироваться во время передачи. В зависимости от объективных показателей происходит настройка параметров и, при возможности, ретрансляция данных. Преимуществом этого подхода является возможность автоматизации процесса тестирования, что позволяет измерять качество обработки видеосистемы при большом количестве различных настроек или измерять качество в реальном времени. Также в результате измерений получаются точные и воспроизводимые данные. Недостаток этого подхода в том, что автоматические метрики могут неверно отражать субъективно воспринимаемое качество. Это может привести, например, к неверному выводу о превосходстве одного кодека над другим [23].

Методы объективной оценки качества цифрового видео подразделяются на три категории. В методах первой категории оценка качества происходит при сравнении декодированной видеопоследовательности с исходной. Объективность этих методов заключается в том, что непосредственного человеческого вмешательства не происходит; вычисление искажения производится автоматически. Вторая категория включает в себя методы, которые сравнивают характеристики оригинальной и декодированной видеопоследовательности. Методы третьей категории оценивают только декодированное видео и его качество. Группа экспертов по видеокачеству VQEG (от англ. Video Quality Experts Group) называет их полным, уменьшенным и независимым методами [24]. Оценка качества видео, основанная на данных видеотрасс, может быть охарактеризована как полный метод.

Традиционные показатели искажения сигнала для определения качества системы используют абсолютную разность между оригинальным и обработанным сигналом. Объективное качество видео обычно измеряется среднеквадратической ошибкой MSE (от англ. Mean Square Error) и пиковым отношением сигнала к шуму PSNR (от англ. Peak Signal-To-Noise Ratio), который вычисляется из MSE и является логарифмическим показателем инверсии этой меры. MSE и его производный показатель PSNR являются традиционными метриками, позволяющими сравнивать любые два изображения. Показатель RMSE называется искажением и PSNR - качеством. По сравнению с другими объективными показателями PSNR легко вычисляется и понятен большинству пользователей. Однако оба показателя не соответствуют субъективному качеству восстановленного изображения и должным образом не отражают малые отличия ухудшения интенсивности.

Показатель структурной схожести SSIM (от англ. Structural Similarity Image Measure) наиболее близок к человеческому восприятию полученной видеопоследовательности. При его применении используется визуально воспринимаемое структурное искажение, тогда как большинство других предложенных методов основываются на чувствительности к ошибкам.

Показатель SSIM определяет схожесть трех компонент изображения: яркость, контраст и структурное сходство.

Данные показатели исследуются постоянно для определения качества видео, сравнивая исходное и закодированное видео кадр за кадром, определяя искажение или качество индивидуально для каждого видеокadra. Качество видеопотока может быть определено по индивидуальным значениям качества видеокadra при использовании элементарной статистики. Обычно считается, что качество видеопотока максимально, если качество каждого отдельного кадра максимально. Переменное качество кадров ухудшает общее качество видео [25].

В таблице 2.6 представлено соответствие субъективной (MOS) и объективной (PSNR) оценки [26].

Т а б л и ц а 2.6 – Соответствие MOS и PSNR

| PSNR, дБ | MOS, % | Качество по шкале ITU |
|----------|--------|-----------------------|
| Более 37 | 81-100 | 5 Прекрасное |
| 31 -37 | 61 -80 | 4 Хорошее |
| 25-31 | 41 -60 | 3 Удовлетворительное |
| 20-25 | 21 -40 | 2 Плохое |
| Менее 20 | 0-20 | 1 Очень плохое |

Знание особенностей человеческого зрения позволяет строить объективные метрики оценки качества видео, наиболее близко коррелированные с субъективными оценками.

2.5 Сравнительный анализ методов оценки качества цифрового видео

2.5.1 Объективные методы оценки качества.

В оптимальном случае, контроль качества видео должен происходить в процессе передачи. В соответствии с измерениями, должно происходить согласование параметров, а также обеспечена возможность повторной передачи передаваемых данных.

Методы объективной оценки качества цифрового видео классифицируются на три категории. Первая категория качества устанавливается при сравнении декодированной видео-последовательности и оригинальной. Своей объективностью данный метод обязан тому факту, что он не зависит от человеческого фактора, поскольку оригинальная видео-последовательность и ее закодированная копия передаются компьютерному алгоритму, который вычисляет различия между ними, как показано на рисунке 2.3.

Эта модель первоначально применялась к картинкам, а затем расширилась до простого применения метрик качества картинок к каждому кадру видеопоследовательности.

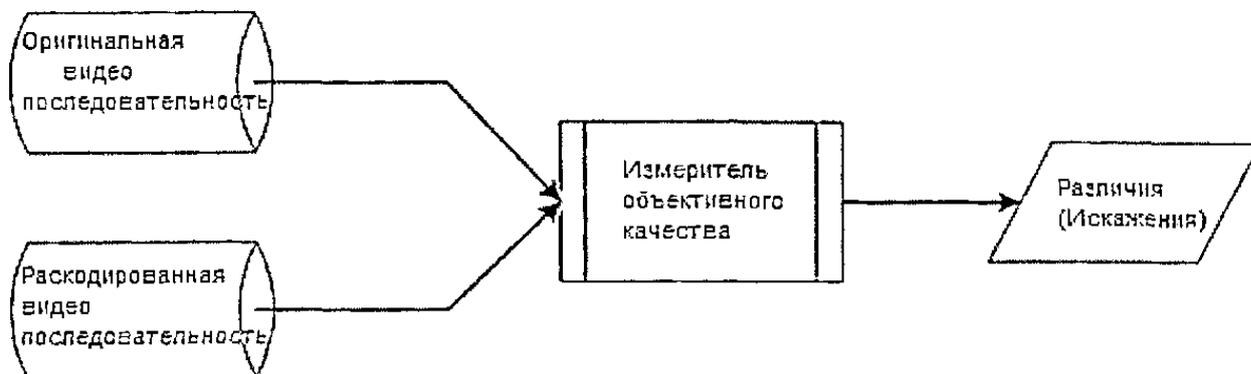


Рисунок 2.3 – Сравнение декодированной и оригинальной видеопоследовательностей

Простейшим методом этой модели является метод среднеквадратических ошибок. Он подсчитывает «разницу» между двумя изображениями. Он может быть применим к цифровому видео усреднением результатов для каждого кадра. Для изображения размером $M \times N$, среднеквадратическая ошибка (Root-Mean-Square Error, RMSE) вычисляется следующим образом

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f'(m,n) - f(m,n)]^2}, \quad (2.9)$$

где f – оригинальное изображение;
 f' – декодированная копия.

Отношение Сигнал/Шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) – это простое математическое улучшение RMSE и вычисляется как

$$R = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f'(m,n)]^2}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f'(m,n) - f(m,n)]^2}. \quad (2.10)$$

Отношение Сигнал/Шум по мощности (Peak-Signal-to-Noise Ratio, PSNR). PSNR это еще одно дополнение, основанное на RMSE, и вычисляется следующим образом

$$PSNR = 20 * \log_{10} \frac{255}{RMSE}. \quad (2.11)$$

PSNR определяется как отношение между сигналом и RMS шумом, наблюдаемым между оригинальным видео и его обработанной копией.

Преимущество PSNR – легкость вычисления. Однако PSNR слабо соответствует характеристикам зрительной системы человека [3]. Он не учитывает особенностей человеческого зрения и поэтому не может надежно предсказывать восприятие визуального качества. Наблюдатель будет осознавать различные виды искажений в цифровом видео, например, замедление (в плане восприятия это будет измеряться как отсутствие гладкости), распад изображения на квадраты, размытость и шум. Все это не может быть измерено при помощи PSNR. Другая категория включает в себя методы, которые сравнивают характеристики, вычисленные для оригинальной и обработанной видеопоследовательности.

Методы третьей категории исследуют только декодированное видео и оценивают качество, используя только эту информацию. Также есть методы экспертных оценок, которые здесь не рассматриваются.

Очевидно, что чем больше требуется информации об исходной видеопоследовательности, тем сложнее задача применения методов на приемном конце. Методы, обеспечивающие полное соответствие образцу, реальны только в нерабочих ситуациях, когда используются заранее известные тестовые видеопоследовательности. При снижении требований методы реализуются, если свойства образца передаются получателю с использованием узкой полосы пропускания для сравнения с вычисленными свойствами принятой последовательности. Традиционно в качестве меры искажения сигнала используется сигнал ошибок для определения качества работы системы. Сигнал ошибки – это абсолютная разница между оригинальным сигналом и обработанным. Традиционными показателями качества являются вышеупомянутые RMSE и PSNR. Эти показатели эффективны, только когда ошибка аддитивна и не коррелирована сигналу, как в случае с цифровым видео. Объективные методы оценки качества пытаются достичь тесной взаимосвязи с субъективными оценками качества видео без потери преимуществ, которые эти методы предлагают. Стандарты ANSI объективного качества видео T1.801.03- 1996 [4] также как и метрики разработанные Институтом Телекоммуникационных Наук (Institute for Telecommunication Sciences, ITS) [5] охватывают взаимосвязи между измеряемыми параметрами качества видео и воспринимаемыми качественными искажениями (размытие границ, мозаичность, шум и т.д.).

Субъективное качество видео — это набор субъективных характеристик качества видео. Здесь интерес представляет то, как видео воспринимается просматривающим и то, какое мнение они высказывают по поводу отдельной видеопоследовательности. Субъективные меры получаются из оценок, даваемых людьми, и могут помочь для вычисления мнения пользователя.

Существует огромное количество способов предоставления видео последовательности эксперту и методов регистрации его или её мнения, но только некоторые из них могут быть стандартизированы. Большинство из них полностью описаны в ITU-R BT.500-11 "Методологии субъективной оценки качества телевизионного изображения" и в ITU-R BT.700.

2.5.2 Метод непрерывной оценки качества.

В методе DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale), каждое испытание состоит из пары стимулов: один стимул — это образец, а второй — проба. Проба обычно представляет собой образец, претерпевающий несколько типов обработки. В каждом испытании оба стимула чередуются случайным образом. Субъектов тестирования (экспертов) не информируют о порядке появления стимулов образца и пробы, и они оценивают (присваивают рейтинг) каждый стимул с помощью отметки на непрерывной шкале качества. Таким образом, в методе DSCQS в каждом испытании определяются две оценки: одна для образца, а другая для пробы.

Время от времени в тесте DSCQS, оба стимула представляют собой образец.

Метод DSCQS обычно применяется для оценки, когда различия между тестовой и образцовой видеопоследовательностью не слишком велики.

По аналогии с методом DSCQS, каждое испытание включает в себя пару стимулов: образец и пробу. Однако в методе DSIS (Double Stimulus Impairment Scale), оба стимула всегда представлены в одном и том же порядке: образец идет всегда первым, а проба — следом за ним. Здесь тестируемые субъекты в отдельном испытании сравнивают два стимула и оценивают степень ухудшения пробы по отношению к образцу, используя пятиуровневую шкалу деградации.

Так, в отдельном DSIS испытании принимается только одно решение.

Метод DSIS преимущественно применяется для определения степени дискомфорта, ощущаемого при ухудшении качества видео, поэтому он первым делом подходит для вычисления производительности систем в которых имеют место видимые искажения. По этой причине данная методика была применена для оценки характеристик различных вариантов систем, работающих на низких и средних скоростях передачи. Поскольку оценка в методе DSIS производится по отношению к образцу, очень важно, чтобы уровень качества пробного стимула не сильно отличался от образцового, в противном случае полезные свойства образца будут потеряны.

В методе SS, каждом испытании рассматривается только один стимул. Эксперты назначают рейтинги каждому стимулу, используя пятибалльную шкалу (Отлично, Хорошо, Удовлетворительно, Плохо, Ужасно).

Методика SS предназначена для ситуаций, когда исходные образцы недоступны.

Поскольку точные образцы не используются в методе SS, зависимость от контекста (эффект влияния на оценку текущего испытания просмотренного материала в предыдущих испытаниях) здесь гораздо сильнее чем, в методах с использованием явного образца. Чтобы скомпенсировать этот эффект, каждый SS тест проводится дважды с показом проб в разной последовательности.

2.5.3 Метод вычисления субъективной оценки качества видео (SAMVIQ).

Существует множество различий между VT.500 и SAMVIQ. Главное отличие - это способ предоставления видеопоследовательности для наблюдателя. В методике SAMVIQ видеопоследовательность показывается в форме мультистимула (множественного стимула), поэтому пользователь может сам для себя определить регламент испытаний и скорректировать свое решение надлежащим образом. Т.к. у зрителей есть возможность непосредственно обсудить искаженные видеопотоки между собой, а также провести сравнение с образцами, то им проще провести ранжирование согласованно. SAMVIQ основан на воспроизведении тестовых файлов в случайном порядке. Отдельный зритель может начинать и останавливать процесс оценивания по своему желанию. Он имеет право сам себе назначить темп предоставления результатов ранжирования; вносить изменения в свою классификацию и повторять воспроизведение при необходимости и т.д. В методе SAMVIQ, оценка качества осуществляется при просмотре явных образцов, скрытые образцы и закодированных кодеками. Здесь, в отличие от DSCQS, где наблюдатель допускал ошибки в суждения из-за отсутствия концентрации, нет таких длительных показов последовательностей видео. В результате, SAMVIQ предлагает более высокую надежность и достоверность, т.е. меньшие значения стандартных отклонений. В большинстве случаев, зритель способен лучше распознать различные аспекты качества при методике SAMVIQ, чем при VT.500. В методе SAMVIQ имеется только один просмотр во время, уменьшающее эффект группы. Наличие явных образцов является обязательным.

Явный образец не сжимают, что позволяет наблюдателю практически точно определить меру качества видео. Метод SAMVIQ обеспечивает общий показатель качества для относительно коротких последовательностей мультимедиа. Традиционно, длительность каждой последовательности находится в пределах 10 - 20 секунд, для того чтобы предоставить субъекту достаточное количество времени для уверенной формулировки результатов ранжирования. Содержимое последовательности должно быть однородным. Для четкой стабилизации результатов оценки качества зрителями требуется широкий диапазон уровней качества. Если же этот диапазон окажется недостаточным, то наблюдателям будет сложно уловить качественную разницу между видеопоследовательностями. Из-за этого уменьшится надежность результатов, а также качество работы кодеков, проверяемых теми же методами.

Перед зрителями ставится задача оценить общее качество изображения каждой презентации при помощи перемещаемого указателя на вертикальной шкале. Эта рейтинговая шкала является непрерывной, что позволяет избежать ошибок дискретизации, но при этом она разделена на пять интервалов равной длины, каждый из которых соответствует обыкновенной пятибалльной шкале

стандарта ITU-R ВТ.500. Шкала является как непрерывной, так и разделенной на равные доли, так как показано ниже в таблице 2.7.

Т а б л и ц а 2.7 – Рав омерная шкала категорий уровня

| | |
|-------------------|--------------|
| Отлично | от 80 до 100 |
| Хорошо | от 60 до 80 |
| Удовлетворительно | от 40 до 60 |
| Плохо | от 20 до 40 |
| Ужасно | от 00 до 20 |

Самому худшему для восприятия качеству следует присвоить отметку "0" (дно шкалы), а наилучшему - отметку "100" (Вершина шкалы).

Для организации единой широкополосной беспроводной сети разработан и предложен стандарт IEEE 802.16, названный WIMAX - Worldwide Interoperability for Microwave Access. Благодаря своим преимуществам технология WIMAX считается наиболее перспективной при переходе к сетям четвертого поколения (4G). В подобных системах пользователи как правило работают с приложением в реальном времени, (поточный трафик), когда невозможно осуществить повторную передачу данных. При этом из-за ограниченности полосы пропускания потеря одного пакета означает значительное ухудшение качества принятой информации.

На сегодняшний день не существует стандартных подходов к определению влияния комплекса ошибок на качество предоставляемых сервисов. Исходя из этого целью данной работы является оценка влияния помехоустойчивости систем широкополосного доступа WIMAX на качество передачи потокового трафика (видео, мультимедиа и данных), разработка рекомендаций по выбору параметров системы передачи с целью обеспечения заданного качества восприятия информации. Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие задачи:

а) экспериментальные исследования статистических характеристик потокового трафика с помощью разработанного измерительного комплекса с целью разработки математической модели для имитационного моделирования широкополосной системы беспроводного доступа WIMAX с учетом подвижности пользователей;

б) разработка алгоритмов оценки вероятности пакетирования ошибок в каналах связи широкополосных систем беспроводного доступа с учетом подвижности объектов на основе полученных экспериментально результатов статистических характеристик потоков ошибок;

в) оценка влияния битовых ошибок и потерь пакетов на качество передачи потокового видео стандарта H.264/AVC в широкополосных сетях беспроводного доступа WIMAX с учетом подвижности пользователей и характеристик декодеров.

3 Исследование характеристик потокового трафика и разработка математических моделей функционирования систем беспроводного доступа

3.1 Структура измерительного комплекса и параметры трафика

Для оценки влияния подвижности абонентов на развернутой сети WiMAX стандарта IEEE 802.16e был проведен ряд экспериментов с использованием базовой и абонентской станций. Базовая станция (БС) установлена на крыше 23-этажного здания. Используются кросс-поляризованные антенны с коэффициентом усиления 9 дБм, ширина диаграммы направленности 90 гр. Азимут направления антенны равен 300 гр. Передвижная абонентская станция (АС) была установлена в автомобиле. Две антенны АС с круговой диаграммой направленности и коэффициентом усиления 2 дБм были установлены на крыше автомобиля. Запись изображения с видеокамеры производилась в движущемся автомобиле на ноутбук и одновременно транслировалась на удаленный компьютер через сеть WiMAX. Сетевая архитектура сети широкополосного доступа WiMAX и общая схема подключения представлена на рисунке 3.1.

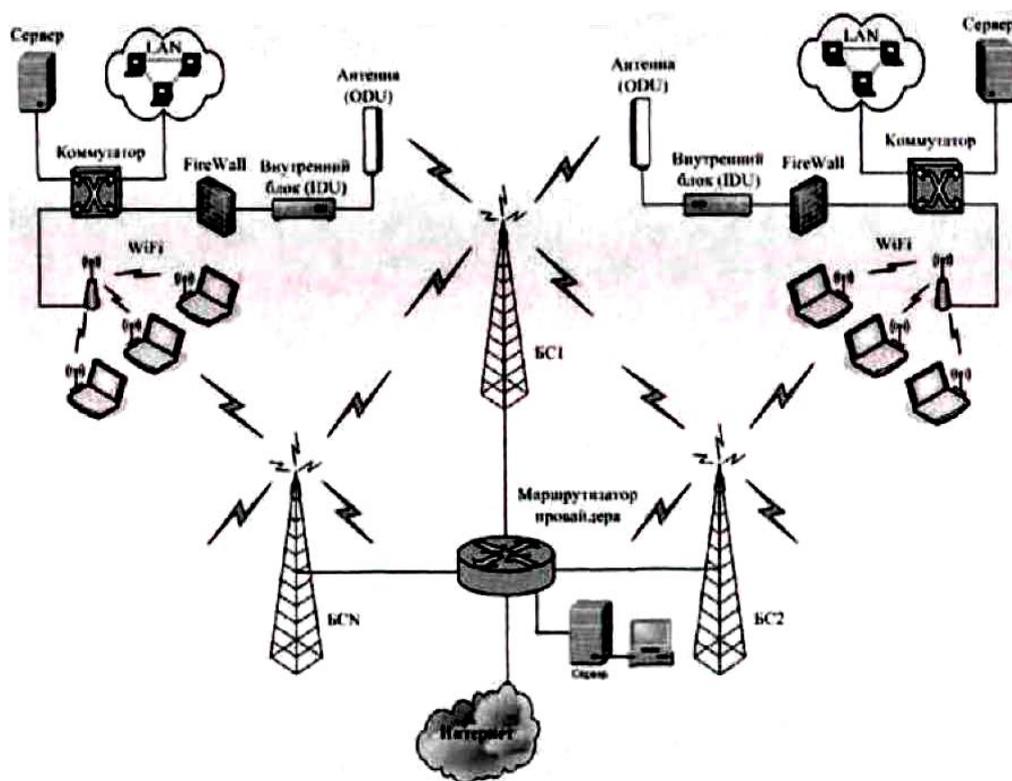


Рисунок 3.1 – Сетевая архитектура сети широкополосного доступа WiMAX

Средняя скорость движения автомобиля составляла 60 км/ч. Максимально удаление от базовой станции равно 950м. На большем протяжении маршрута между БС и АС отсутствует прямая видимость, тем самым основными причинами возникновения помех при трансляции являются отражение, многолучевость, рассеивание и др. Маршрут движения автомобиля, расположение БС приведены на рисунке 3.2.

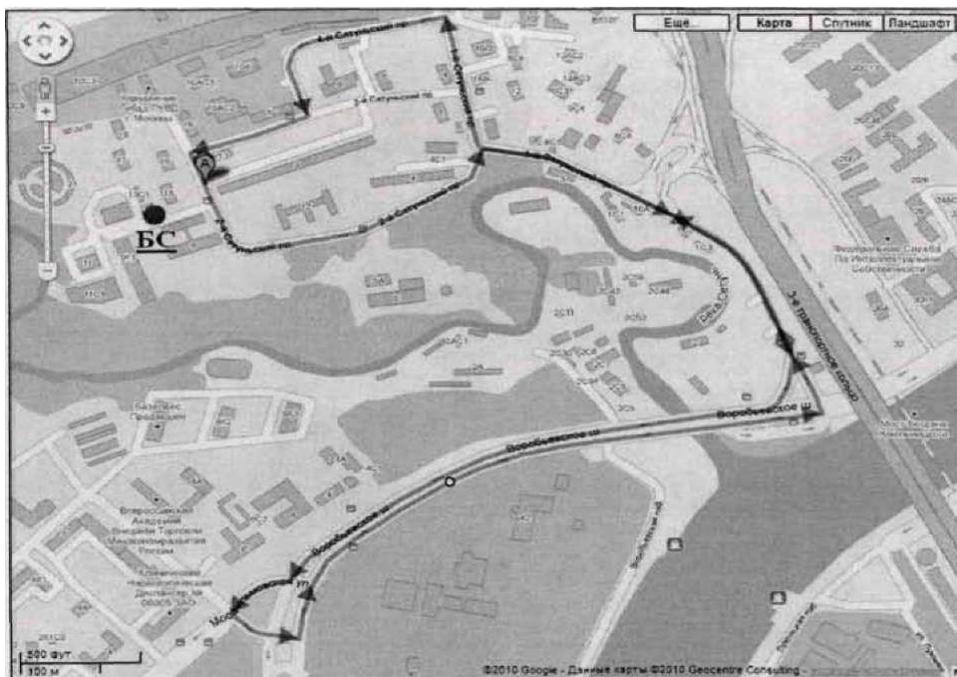


Рисунок 3.3 – Маршрут движения

Оборудование и программное обеспечение. Для построения сети WiMAX и трансляции видеопотока использовалось следующее оборудование:

- базовая станция RuggedMAX™ WiN7000. Полоса используемых частот 1350 - 1400 МГц, соответствие WiMAX Forum Wave 2;
- Profile, IEEE 802.16e OFDMA, метод уплотнения TDD, максимальная мощность передачи 36 дБм [140];
- абонентская станция RuggedMAX™ WiN5100. Полоса используемых частот 1350 - 1400 МГц, соответствие WiMAX Forum Wave 2 Profile, IEEE 802.16e OFDMA, метод уплотнения TDD, максимальная мощность передачи 23 дБм;
- ноутбук DELL Latitude D43 0;
- веб-камера Logitech QuickCam Pro 9000;
- видео транслировалось в течение 30 минут со следующими параметрами: формат MP4;
- кодек H.264;
- постоянный битрейт 600 кбит/с;- частота кадров 25;
- разрешение 640x480.- тип GOP IPBBPBB.

Трансляция по сети осуществлялась при помощи сервера потокового вещания DarwinStreamingServer и медиа плеера QuickTimePlayer компании Apple. Информация о передаваемых и принятых из сети пакетах производилась с помощью анализатора протоколов Wireshark. Синхронизация переданной и принятой видеопоследовательности производилась с помощью программы VirtualDub [8].

Измерения проводились на базе технологии беспроводного доступа WiMAX. Технология WiMAX обеспечивает мультисервисность, гибкое распределение частот, задание приоритетов различным видам трафика, возможность обеспечения разного уровня качества (QoS). Структура сети на основе технологии WiMAX, в которой были проведены экспериментальные исследования входящего и исходящего трафиков показана на рисунке 3.1. Исследуемая сеть представляет собой совокупность базовых станций (БС) и приемопередающих клиентских терминалов.

Базовая станция (БС) представляет собой многопоточную станцию с высокой выходной мощностью, работающая в полнодуплексном режиме. Она имеет централизованную архитектуру организации сети и управления и предназначена для выполнения различных сервисов с высокой надежностью и доступностью. Базовая станция обеспечивает все функциональные возможности, которые необходимы для организации соединений абонентских терминалов с сервисом провайдера.

Клиентский терминал состоит из внешнего ODU (OutDoor Unit) и внутреннего IDU (InDoor Unit) модулей. Внешний модуль выполняет функцию высокочастотного тракта, а также содержит все активные компоненты и плоскую интегрированную антенну с высоким коэффициентом усиления. Внутренний модуль выполняет следующие функции: передачу Ethernet-данных, управление системой, мультиплексирование и маршрутизацию потоков, а также подачу питания на внешний блок.

Брандмауэр (FireWal) обеспечивает защиту внутренней сети от внешнего воздействия со стороны Интернета, а также блокирует неиспользуемые соединения и пакеты, обеспечивая защиту на прикладном уровне. Коммутатор распределяет полученный трафик между двумя сетями LAN и WiFi, которые контролируются сервером.

Регистрация данных осуществлялась с помощью маршрутизатора сети WiMAX в направлениях downlink и uplink.

Ядро сети (рисунок 3.3) состоит из сервера авторизации, аутентификации и учета трафика AAA (Authentication, Authorization, Accounting), серверов приложений, серверов VoIP-телефонии, шлюзов доступа в глобальную сеть Интернет. Данная структура также называется Домашним Агентом (НА - Home Agent). На AAA-сервер посылаются запросы пользователей для авторизации. В зависимости от правильности предоставленных данных и политики учета пользователю предоставляется (не предоставляется) доступ к сети и ее ресурсам. Здесь же ведется учет трафика пользователя. SIP-сервер обрабатывает запросы и производит соединение

абонентов, пользующихся услугами IP-телефонии. В зависимости от назначения звонка, он может быть перенаправлен сеть Интернет или в ГТС. На серверах приложений находится различная информация, которая может быть интересна пользователям. Это могут быть файловые серверы, игровые серверы, серверы, предоставляющие услуги «видео по запросу».

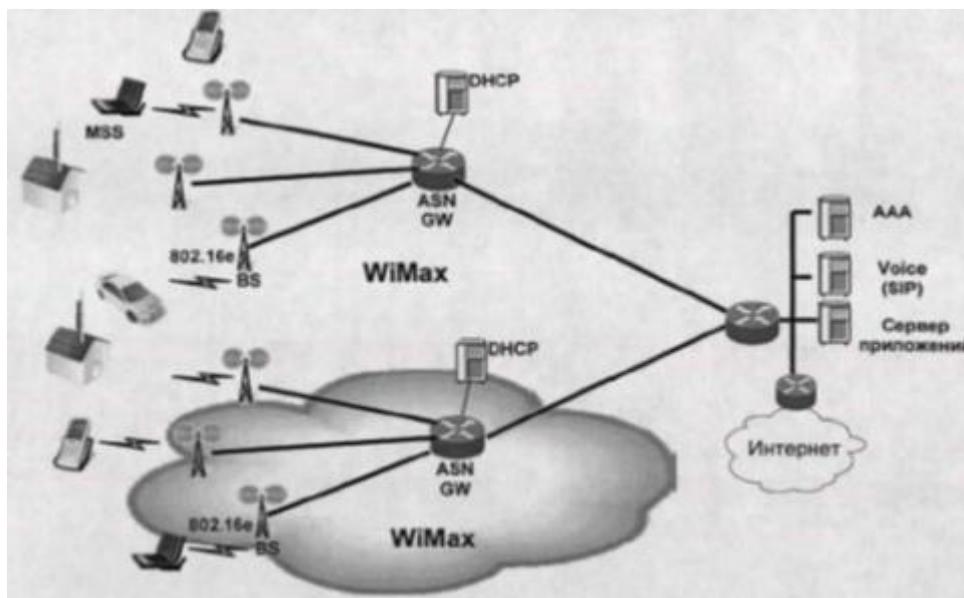


Рисунок 3.3 – Архитектура сети

Шлюз сети доступа ASN GW (Access Service Network GateWay) позволяет осуществлять переход мобильных клиентов MSS (Mobile Subscriber Station) от одной базовой станции BS (Base Station) БС к другой, отправляет запросы абонентских станций на AAA-сервер, выдает IP-адреса абонентским станциям.

В технологии WiMAX используется модуляция OFDM. Стандарты 802.16 - 2004 и 802.16e предназначены для работы на частотах от 2 ГГц до 11 ГГц и позволяют гибко устанавливать полосы от 1,25 МГц до 20 МГц. Так, стандарт 802.16e реализуется в частотных диапазонах 2300-2400 МГц, 2496-2690 МГц и 3400-3600 МГц. Стандартом 802.16—2004 предусматривается или применение метода с прямым расширением спектра (только в условиях прямой видимости), или применение OFDM, наиболее подходящее для условий существования прямой и не прямой видимости. В стандарте 802.16e используется технология ортогонального частотного уплотнения OFDMA с динамическим распределением частотных поднесущих между терминалами пользователей, как более приспособленная для мобильной связи. При этом определены следующие полосы: 1,25 МГц - 128 поднесущих; 5 МГц - 512 поднесущих; 10 МГц - 1024 поднесущих; 20 МГц - 2048 поднесущих.

Важной особенностью стандарта IEEE 802.16e является поддержание высокого, динамически управляемого уровня качества (QoS) для разных типов передаваемых данных. Система способна автоматически определять

тип связи и предоставлять разную полосу частот и разный уровень качества. Например, для VoIP, для радио- и видео вещания возможен больший уровень потерь пакетов, чем для передачи данных, однако требуется существенно меньшее запаздывание и нестабильность времени задержки.

Спецификация тестовых последовательностей Форман и Клэр использованных при проведении измерений, приведена в табл. 2.1. Эти две видеопоследовательности были закодированы в формате MPEG4 при помощи бесплатного программного обеспечения, которое называется FFMPEG кодировщик [6].

На видео Форман показан говорящий мужчина, который руками указывает на строящийся дом. В ролике Клэр представлена говорящая женщина на неподвижном фоне.

Эти видеопоследовательности имеют временное разрешение 30 кадров в секунду, а также групповую структуру (Group of Pictures, GoP) IBPPBPPBPPB.

Каждая последовательность была закодирована на низком, среднем и высоком качестве видеопотока, что соответствует скоростям 64 Кбит/с 256 Кбит/с и 768 Кбит/с. В таблице 3.1 можно увидеть взаимосвязь между величинами PSNR.. Так в последовательности Клэр большему среднему значению соответствует меньшее стандартное отклонение.

Т а б л и ц а 3.1 – Статистические данные кодированных последовательностей

| Отсчеты | Пространственное разрешение | Номер фрейма | Скорость передачи данных, Кбит/с | №1 фрейма | №P фрейма | № B фрейма | Среднее PSNR (ДБ) | СКО PSNR (ДБ) |
|---------|-----------------------------|--------------|----------------------------------|-----------|-----------|------------|-------------------|---------------|
| Форман | 176*144 | 400 | 64 | 39 | 95 | 266 | 30.87 | 2.29 |
| | | | 256 | 34 | 100 | 266 | 35.91 | 1.84 |
| | | | 768 | 34 | 100 | 266 | 40.53 | 1.36 |
| Клэр | 176*144 | 494 | 64 | 42 | 124 | 328 | 41.85 | 1.33 |
| | | | 256 | 42 | 124 | 328 | 45.50 | 0.63 |
| | | | 768 | 42 | 124 | 328 | 45.50 | 0.63 |

Измерения проводились для двух топологий, показанных на рисунках 3.4-3.5. Данная топология (рисунок 3.3) состоит из сервера видеопотоков, двух магистральных маршрутизаторов и нескольких (фиксированных /мобильных, проводных/беспроводных) видео клиентов. Сервер видео подключен к первому маршрутизатору с помощью линии связи с пропускной способностью 10 Мбит/с и с задержкой распространения 10 мс. В дальнейшем эти значения останутся неизменными для всех сценариев. Первый роутер соединен со вторым каналом, для которого точно не определены значения полосы пропускания и временной задержки. Ширина полосы в этом канале

может варьироваться от 100 Кбит/с до 1 Мбит/с, а задержка - от 10 до 100 мс. Значение вероятности потери пакетов может составить 0,001.



Рисунок 3.3 – Топология измерительного стенда для первого сценария

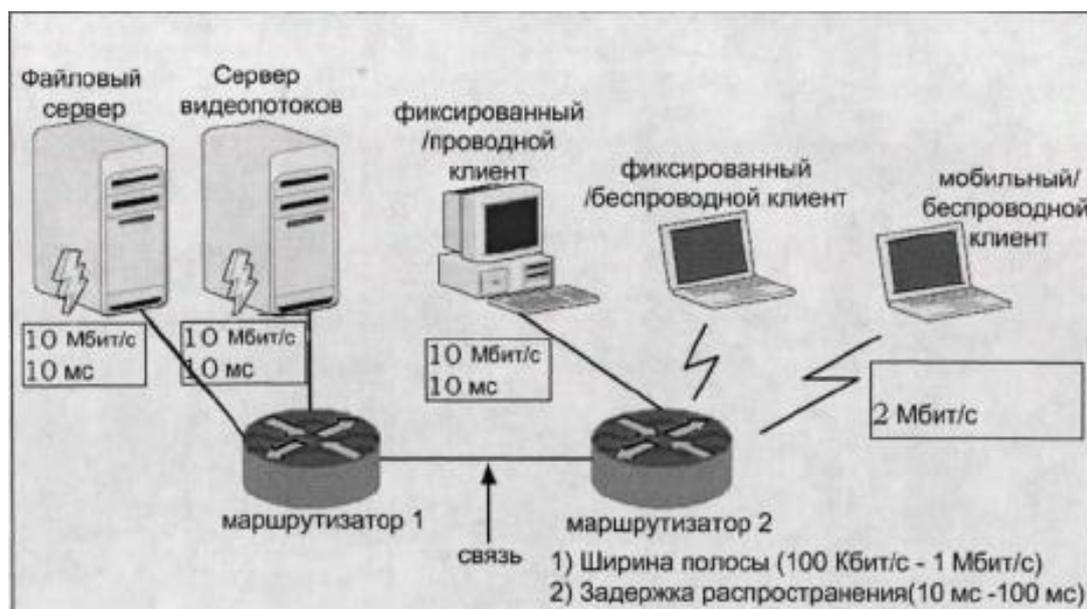


Рисунок 3.4 – Топология измерений для второго сценария

Эта топология использовалась нами для различных сценариев со стационарными проводными клиентами, стационарными беспроводными клиентами и мобильными беспроводными клиентами.

В дополнение к первой топологии представлена еще одна дополнительная топология, проиллюстрированная на рисунке 3.4, которая отличается от первой наличием нового сетевого узла: файлового сервера. Этот

сервер, будучи подключен к первому маршрутизатору, используется как источник фонового пульсирующего трафика в сети.

4 Оценка качества передачи потоковых данных в широкополосных системах беспроводного доступа

4.1 Результаты имитационного моделирования помехоустойчивости wimax в среде mathworks matlab и пакете визуального моделирования simulink

Рассмотрим результаты имитационного моделирования системы широкополосного доступа стандарта 802.16 в среде Matlab Simulink. Структура и описание моделирующего комплекса приведена в Приложении 1. Как правило, основной целью моделирования является оценка производительности системы WiMAX при различных параметрах модели для более глубокого понимания процессов внутри системы. Посредством сравнения данных, полученных в результате моделирования процесса передачи данных, рассмотрим целесообразность использования определённых параметров в качестве фактора увеличения помехоустойчивости передачи. К параметрам, явно влияющим на помехоустойчивость, можно отнести такие параметры, как:

- а) коэффициент кодирования;
- б) тип модуляционного манипулирования;
- в) скорость передвижения пользовательского терминала;
- г) схема передачи по радиоканалу (SISO/MIMO);
- д) применение вспомогательных технологий (AMC).

Результаты каждого имитационного моделирования выражаются как аппроксимированная зависимость коэффициента ошибок (BER) от соотношения энергии одного бита сигнала к спектральной плотности мощности шума в канале передачи. Данную зависимость можно считать мерой КПД моделируемой системы, так как высокий показатель соотношения энергии на бит к шуму означает большие энергетические затраты на передачу.

При моделировании по умолчанию используются следующие параметры канала: частота нисходящих передач 2 ГГц; пропускная способность канала 20 МГц; коэффициент длины циклического префикса $C=1/16$, что соответствует небольшой задержке распространения сигнала; тип модуляции и коэффициент кодирования, соответствующие режиму AMC3.

Параметры моделирования: остановка моделирования при достижении 5000 принятых ошибочных бит; остановка моделирования при достижении 1000000 принятых бит; предельные значения уровня E_b/N_0 [-5;30] дБ с шагом 1 дБ.

Рассмотрим влияние кодирования на помехоустойчивость передачи сигнала. Алгоритмы свёрточного кодирования, применяемые в системах передачи данных, предназначены для повышения надёжности передачи и сильно зависят от качества канала. Если радиоканал имеет незначительные

замирания и шумы, позволяя тем самым не опасаться за возникновение ошибочных бит, то в этом случае возможно использование высших коэффициентов кодирования вплоть до 1, что означает отсутствие кодирования.

Согласно спецификации стандарта 802.16, в системах передачи \ViMAX используются следующие коэффициенты кодирования: $> \% \text{ " } \% \bullet$

На рисунке 4.1 представлена зависимость, иллюстрирующая резкое снижение достоверности передачи при понижении качества радиоканала. Из графика видно, что приемлемый уровень ВЕК даже порядка 10^{-4} может быть достигнут только при соотношении энергии на бит к шуму не менее 22 дБ; для достижения гарантированного детектирования потребуется соотношение порядка 30 и более дБ. В результате последовательности запусков моделирования системы с различными параметрами, отвечающими за схему кодирования передаваемого сигнала, и последующего анализа полученных данных были построены зависимости, чётко отражающие влияние данных параметров на качество передачи данных.

В ходе моделирования были использованы параметры по умолчанию: частота нисходящих передач 2 ГГц; пропускная способность канала 20 МГц; коэффициент длины циклического префикса $C=1/16$; тип модуляции и коэффициент кодирования, соответствующие режиму АМСЗ.

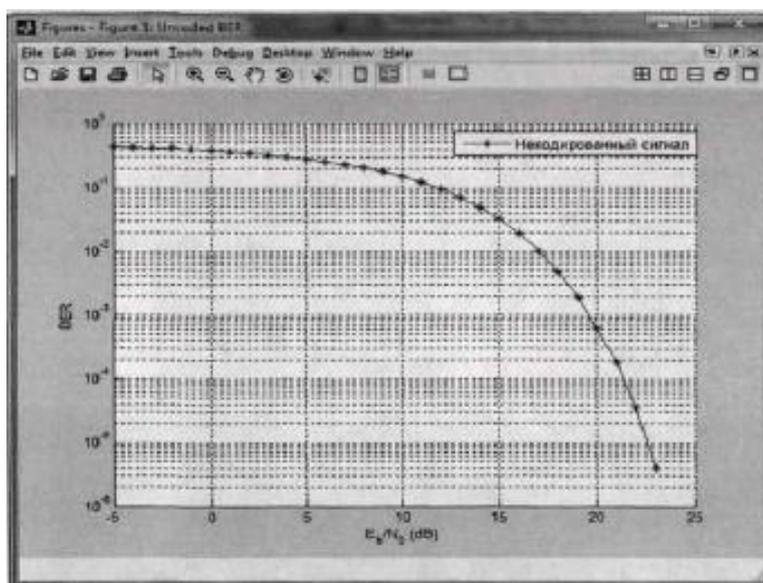


Рисунок 4.1 – График зависимости ВЕК от E_b/N_0 при передаче не кодированного сигнала

Графики зависимости, изображённые на рисунке 4.2, наглядно демонстрируют снижение уровня коэффициента битовых ошибок при понижении коэффициента кодирования.

Выбор оптимального коэффициента кодирования зависит не только от ожидаемого качественного уровня радиоканала, но и от требуемой скорости

передачи данных. Понижение коэффициента кодирования означает увеличение количества дополнительных бит в контрольной битовой последовательности, генерируемой блоком кодера канала, что в свою очередь ведёт к снижению уровня информационных бит в передаваемом кадре и пропускной способности канала.

Влияние типа модуляции на помехоустойчивость. При моделировании системы некоторые коэффициенты не используются, хотя спецификацией стандарта \vитах чётко определены семь режимов работы, определяемые соответствием типа используемой модуляции и общим коэффициентом кодирования. Использование каждого режима модуляции и кодирования объясняется оптимальностью данного режима при определённых качественных параметрах канала. Список режимов работы приведён в таблице 4.1.

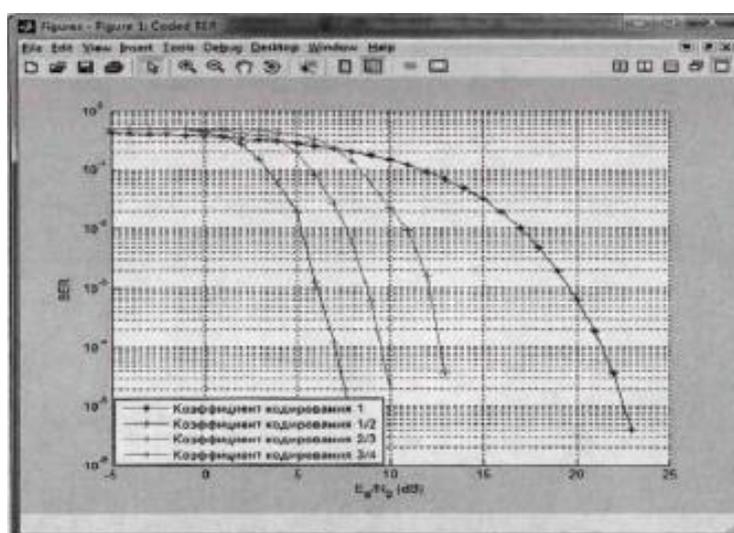


Рисунок 4.2 – Графики зависимостей ВЕК от ЕБЛЧо при передаче кодированного сигнала

Т а б л и ц а 4.1 – Схемы модуляции и коэффициенты кодирования

| Режим модуляции и кодирования | Схема модуляции | Коэффициент кодирования |
|-------------------------------|-----------------|-------------------------|
| AMC1 | 2-PSK | 1/2 |
| AMC2 | 4-QAM | 1/2 |
| AMC3 | 4-QAM | 3/4 |
| AMC4 | 16-QAM | 1/2 |
| AMC5 | 16-QAM | 3/4 |
| AMC6 | 64-QAM | 2/3 |
| AMC7 | 64-QAM | 3/4 |

На рисунке 4.3 приведены графики зависимостей коэффициента битовых ошибок, полученных в результате моделирования с использованием различных режимов модуляции и кодирования. Высокий уровень ЕБ/Ю

означает, что для передачи каждого бита необходимо затратить большее количество энергии. Схемы модуляции с низкой спектральной плотностью, такие как 2-РАМ и 4-ЗАМ, требуют меньший уровень ЕБМО и, следовательно, являются более энергоэффективными и в меньшей степени подвержены появлению ошибочных битов.

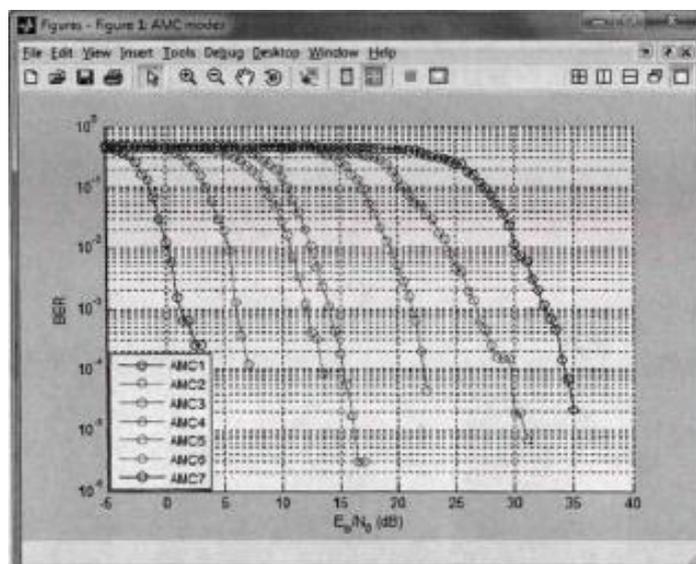


Рисунок 4.3 – Графики зависимости BER от E_b/N_0 при использовании различных режимов AMC

Теоретическое значение ВЕК может быть получено из следующей расчётной формулы

$$P_{bc} = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M_a}} \right) Q \left(\sqrt{\frac{3 E_b}{M_a N_0}} \right), \quad (4.1)$$

где P_{bc} - вероятность битовой ошибки на несущую; M_a определяет алфавит схемы модуляции;

$Q(x)$ является видом функции дополнительной Гауссовой ошибки, означающей вероятность того, что переменная d_{Γ_0} , имеющая распределение по закону Гаусса, больше чем x .

Вероятность битовой ошибки вычисляется как

$$P_b = 1 - (1 - P_{bc})^2, \quad (4.2)$$

где P_{bc} – вероятность битовой ошибки на несущую;

P_b – общая вероятность битовой ошибки.

Теоретические значения ВЕК несколько отличаются от приведённых результатов симуляции. Разницу между теоретическим и полученным значениями можно вычислить по формуле

$$SNR_{loss} = 10 \log\left(\frac{200}{192} \frac{17}{16}\right) = 0.44. \quad (4.3)$$

Формула показывает возможный сдвиг значений, где 200/192 - это коэффициент числа ненулевых поднесущих (данных и управляющих) к числу поднесущих данных, а 17/16 представляет отношение длительности передачи данных с и без добавления циклического префикса, относительная длина которого определена в модели как $G = 1/16$.

4.2 Влияние скорости передвижения терминала пользователя на помехоустойчивость

Перемещение передающего терминала в пространстве во время передачи сигнала по радиоканалу сопровождается явлением, называемым эффектом Доплера. Для волн, распространяющихся в физической среде нужно принимать во внимание движение как источника, так и приёмника волн относительно этой среды. Для электромагнитных волн, для распространения которых не требуется среда, имеет значение только относительное движение источника и приёмника. Сущность явления состоит в изменении расстояния между гребнями волн при изменении скорости перемещения передающего устройства в зависимости от направления его движения.

Имитационное моделирование системы с целью анализа влияния скорости передвижения на помехоустойчивость передачи данных производится при следующих параметрах: частота нисходящих передач 2 ГГц; пропускная способность канала 20 МГц; коэффициент длины циклического префикса $G=1/16$; тип модуляции и коэффициент кодирования, соответствующие режиму АМСЗ; Максимальная величина сдвига Доплера, одинаковая для всех путей распространения сигнала рэлеевской модели канала, соответствует определённым скоростям передвижения передатчика (таблица 4.2).

Как видно из графиков на рисунке 4.4, скорость передвижения в значительной степени влияет на помехоустойчивость.

Т а б л и ц а 4.2 – Соответствие максимальной величины сдвига Доплера и скоростей передвижения пользовательского терминала, используемых при моделировании

| Скорость передвижения, км/час | Максимальный сдвиг Доплера. Гц |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 0 |
| 6 | 11.2 |
| 30 | 56 |
| 60 | 112 |
| 120 | 224 |

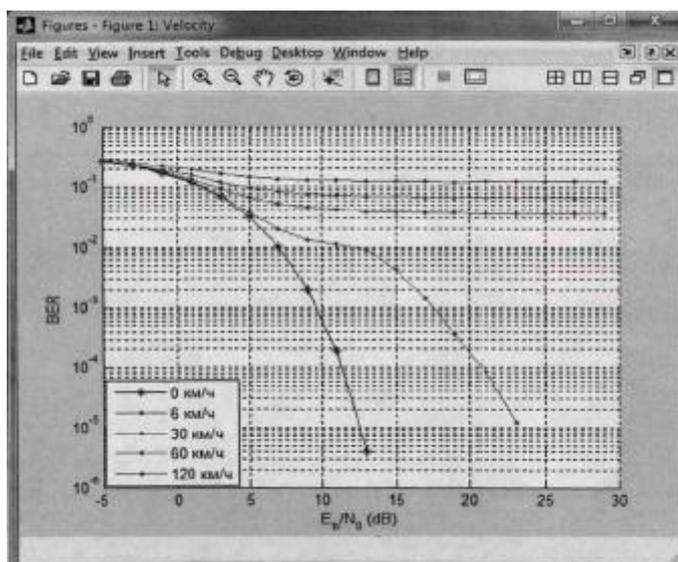


Рисунок 4.4 – Графики зависимостей помехоустойчивости передачи данных от скорости передвижения пользовательского терминала

Скорости передвижения до 12-13 км/ч имеют небольшое влияние на коэффициент ошибок, в то время как скорости порядка нескольких десятков км/ч уже ощутимо снижают надёжность передачи. Скорости выше 100 км/ч совершенно нарушают передачу данных, так как при такой скорости передвижения коэффициент битовых ошибок не достигает уровня ниже 10^{-1} .

4.3 Влияние на помехоустойчивость технологии ММО

Было проанализировано качество технологии передачи сигнала в радиоканале посредством нескольких передающих и принимающих антенн на примере схемы со следующими параметрами: частота нисходящих передач 2 ГГц; пропускная способность канала 20 МГц; коэффициент длины циклического префикса $G=1/16$; тип модуляции и коэффициент кодирования, соответствующие режиму АМСЗ; использование двух передающих и одной принимающей антенн; использование алгоритма пространственного мультиплексирования по алгоритму ортогонального блочного кодирования С. Аламоути. Алгоритмы пространственного мультиплексирования призваны уменьшить влияние замираний в канале на достоверность передаваемых данных. Далее в данном разделе будет рассмотрено влияние применения технологии ММО при различных параметрах системы WiMAX.

Как видно из графика на рисунке 4.5, помехоустойчивость передачи данных возросла по сравнению со схемой SISO. Для сравнения помехоустойчивости при различных скоростях кодирования в результате моделирования были также получены графики зависимостей, соответствующие коэффициентам кодирования, аналогичным

использованным выше. Результаты моделирования представлены на рисунках 4.5-4.7.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что введение дополнительной передающей антенны положительно влияет на помехоустойчивость передачи как не кодированного информационного сигнала, так и сигнала закодированного на различных скоростях.

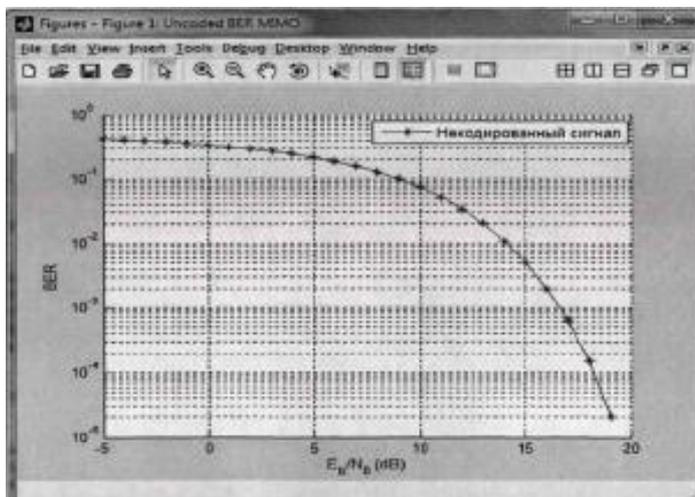


Рисунок 4.5 – График зависимости BER от E_b/N_0 при передаче некодированного сигнала в схеме MIMO

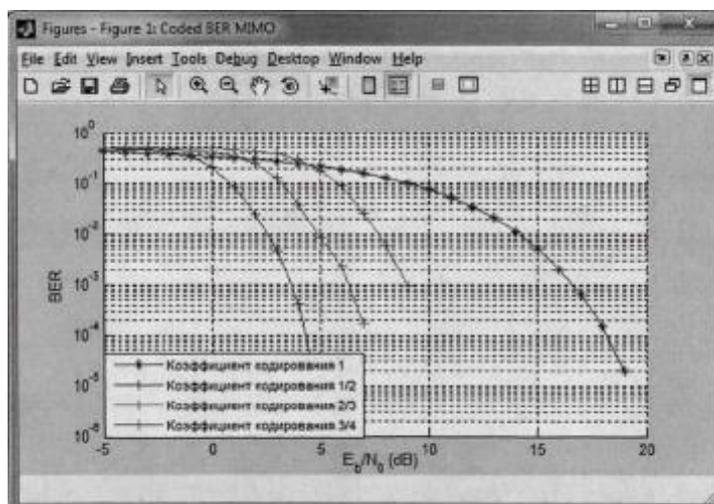


Рисунок – 4.6 Графики зависимостей BER от E_b/N_0 при передаче кодированного сигнала в схеме MIMO

Рассмотрим влияние технологии MIMO на помехоустойчивость системы WiMAX при использовании различных типов модуляции. Ранее были приведены установленные стандартом 802.16 режимы работы системы, определяющие используемый тип модуляции и коэффициент кодирования.

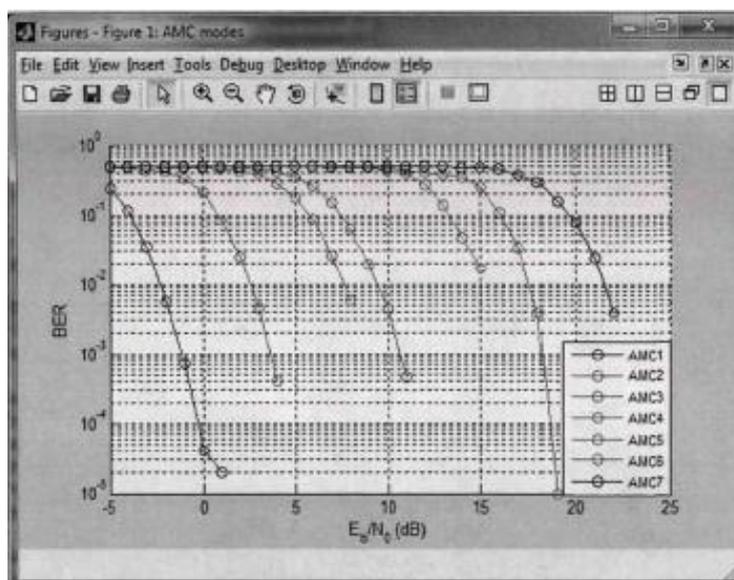


Рисунок 4.7 – Графики зависимостей BER от E_b/N_0 при использовании различных режимов AMC в схеме MIMO

В результате последовательности запусков моделирования системы с различными параметрами, определяющими режим работы и тип модуляции, были получены зависимости коэффициента битовых ошибок от E_b/N_0 для каждого режима работы системы в схеме MIMO, аналогичные зависимостям в схеме SISO.

Существенное снижение коэффициента битовых ошибок при применении технологии MIMO с любым из режимов AMC, которое можно извлечь из сравнения графиков на рисунках 4.5 и 4.7 как и ожидалось, еще раз показывает практическую выгоду применения алгоритмов пространственного мультиплексирования.

Рассмотрим влияние технологии MIMO на помехоустойчивость передачи сигнала при перемещении передающего и принимающего устройств относительно друг друга. Расчетное значение сдвига Доплера при этом остается тем же, но применение нескольких передающих или принимающих антенн теоретически должно ослабить влияние эффекта Доплера на передачу и упростить нахождение эталонного вида сигнала на принимающей стороне.

При моделировании системы в условиях относительного движения конечных устройств друг относительно друга были использованы те же параметры системы, что и ранее, а именно:

- частота нисходящих передач 2 ГГц;
- пропускная способность канала 20 МГц;
- коэффициент длины циклического префикса $G=1/16$;
- тип модуляции и коэффициент кодирования, соответствующие режиму AMC3;
- максимальная величина сдвига Доплера, одинаковая для всех путей распространения сигнала рэлеевской модели канала, соответствующая

определённым скоростям передвижения передатчика, представленным в таблице 4.2.

Полученные результаты моделирования представлены на рис. 4.8. Как видно из сравнения графиков зависимостей на рис. 4.6 и 4.8, применение нескольких передающих и принимающих антенн ощутимо повышает коэффициент вероятности возникновения битовой ошибки, при относительном перемещении передающего и принимающего устройств. Такое заключение можно вывести из факта, что приращение помехоустойчивости системы от применения технологии многоантенной передачи напрямую зависит от частоты смены канальных коэффициентов радиоканала. При увеличении скорости движения канальная матрица меняется с большей частотой, а следовательно системе становится сложнее справиться с возросшей нагрузкой на функциональный блок STC.

В завершении анализа влияния технологии MIMO на помехоустойчивость передачи данных рассмотрим, как влияет на помехоустойчивость увеличение количества передающих и принимающих антенн. Степень этого влияния принято, по рекомендациям ITU-Т, измерять в уменьшении степени 10 коэффициента BER на каждые 10 дБ приращения отношения мощности сигнала к шуму.

Анализируя графики зависимостей, приведенные на рисунке 4.8, можно определить степени влияния при применении различных схем передачи (таблица 4.3).

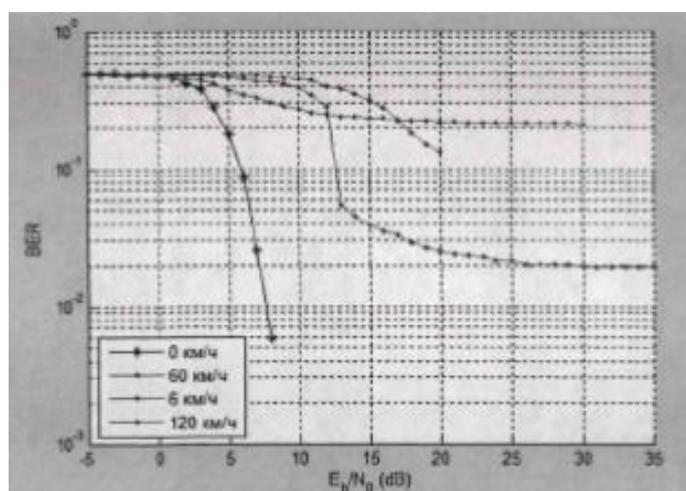


Рисунок 4.9 – Графики зависимостей помехоустойчивости передачи данных от скорости передвижения пользовательского терминала в схеме MIMO

Также из графиков видно, что схемы передачи несимметричны; т.е. схема с двумя принимающими антеннами опережает схему с двумя передающими антеннами в плане помехоустойчивости примерно на 2 дБ. Это объясняется тем, что только один символ OFDM передаётся за один период времени в схеме с одной передающей антенной, следовательно,

среднесуммарная мощность передаваемого сигнала равна мощности передаваемого сигнала.

Т а б л и ц а 4.3 – Схемы передачи данных и соответствующие степени влияния на помехоустойчивость

| Схема передачи | Степень влияния на помехоустойчивость |
|----------------|---------------------------------------|
| 1 x 1 | 1 |
| 1 x 2 | 2 |
| 2 x 1 | 3 |
| 2 x 2 | 4 |

Из результатов видно, что степень влияния схемы передачи на помехоустойчивость можно представить в виде формулы

$$D = N_T N_R, \quad (4.4)$$

где N_T – количество передающих антенн;
 N_R – количество принимающих антенн;
 D – степень влияния.

Вследствие этого результирующий сигнал не получает коэффициент приращения в блоке STC соответствующем алгоритму С. Аламоути.

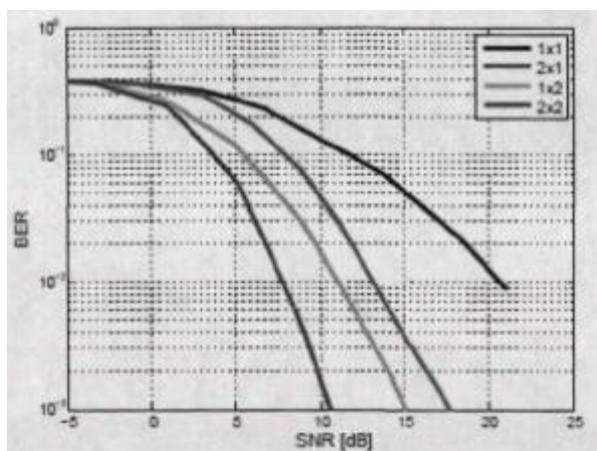


Рисунок 4.9 – Сравнение помехоустойчивости схем передачи данных

В итоге применение технологии MIMO при построении системы WiMAX имеет множество преимуществ, среди которых: увеличенная по сравнению со схемой SISO устойчивость к возникновению вследствие замираний в радиоканале ошибочных битовых блоков в принимаемом сигнале; увеличенная по сравнению со схемой SISO пропускная способность системы в целом за счёт одновременной передачи нескольких символов OFDM в один период времени при использовании нескольких передающих радиоантенн; лучшая устойчивость к влиянию со стороны эффекта Доплера.

5 Экспериментальная часть

В исследовании использовались два видеофрагмента, которые кодировались с различными скоростями 64 Кбит/с, 256 Кбит/с и 768 Кбит/с, чтобы получить образцы с разным качеством. В качестве изменяемых величин в эксперименте брались основные параметры магистральной линии, связывающей два маршрутизатора: ширина полосы пропускания (100 Кбит/с, 500 Кбит/с, 1 Мбит/с) и временная задержка распространения в канале (10 мс, 50 мс, 100 мс).

Величина вероятности потери пакетов устанавливалась равной 10^{-3} . Все значения изменяемых параметров первого сценария представлены в таблице 5.1.

Т а б л и ц а 5.1 – Параметры сценариев

| Скорость передачи данных | Ширина полосы | Задержка распространения |
|--------------------------|---------------|--------------------------|
| 64 Кбит/с | 100 Кбит/с | 10 мс |
| 256 Кбит/с | 500 Кбит/с | 50 мс |
| 768 Кбит/с | 1 Мбит/с | 100 мс |

Оценка поведения беспроводных каналов на основе слежения за статистическими характеристиками качества связи.

Распространение разнообразных видов беспроводных сетей связи, включая беспроводные сети LAN и сети с пакетной коммутацией, стимулирует интерес к оценке поведения потерь беспроводных технологий. Известно, что беспроводная связь имеет более высокие, чем проводная связь, вероятности ошибки, а аналитическая или экспериментальная оценка уровня ошибок в таких сетях существенно зависит от условий распространения радиоволн. Оценка поведения потерь во времени является важной проблемой, так как это один из важнейших параметров, влияющий на все уровни сети.

Из-за большого числа протоколов на различных сетевых уровнях часто невозможно получить подобные оценки. Лучшей альтернативой является слежение за поведением существующих реализаций процессов. В этой связи целесообразно создать реалистичные модели поведения беспроводного канала и использовать их для сравнения используемых протоколов и алгоритмов.

Хотя для моделирования линий связи с потерями часто используются модели с равномерной вероятностью ошибок, они, как правило, не адекватно описывают результаты измерений ошибок в беспроводных каналах.

Целью исследований, рассмотренных ниже, является разработка реалистичной математической и имитационной модели поведения потерь беспроводных каналов связи, которая не слишком сложна для исполнения.

Задача точной оценки потерь для беспроводной сети является перспективной, так как качество беспроводного канала может резко меняться

в зависимости от места ее расположения и времени. Воспользуемся подходом, основанным на «следах» и состоящим из трех фаз: сбор следов, анализ и их оценка. На фазе сбора следов собирается большое количество наблюдений для множества различных сценариев работы сети. Фаза анализа включает выделение представляющих интерес данных, таких например как ошибки пакетов, и их моделирование. В фазе оценки имитируются разработанные модели и сравниваются со следами и реальными измерениями.

Возможность наблюдения за сетью, как со стороны базовой станции, так и со стороны мобильного хоста, можно проиллюстрировать на рисунке 1. Процесс сбора наблюдений включает два основных компонента: исполнительное устройство слежения и анализатор следа. Исполнительное устройство слежения находится в узле, где оно может записывать данные, которые, как правило не доступны для получения на уровне пользователя. "Ловушки" в узле добавлены к драйверам сетевых устройств для того, чтобы пропустить каждый Принимаемые пакеты и информация об аппаратуре анализируется в специальных «анализаторах» (ловушках), подключенным к исполнительному устройству. Эти данные периодически выделяются из буфера узла и записываются на диске анализатора следа уровня пользователя.

Такие данные, как уровень сигнала, уровень шума, качество сигнала и статус ошибки также могут быть записаны для последующей обработки и анализа.

Генерирование рабочей нагрузки. Для генерирования трафика для измерений ошибки, более предпочтителен протокол данных UDP по сравнению с протоколом TCP, так как он не имеет механизмов восстановления ошибок и установления соединений. Каждый пакет пользовательского протокола данных специально отформатирован для включения информации обнаружения ошибок, такой как номер последовательности.

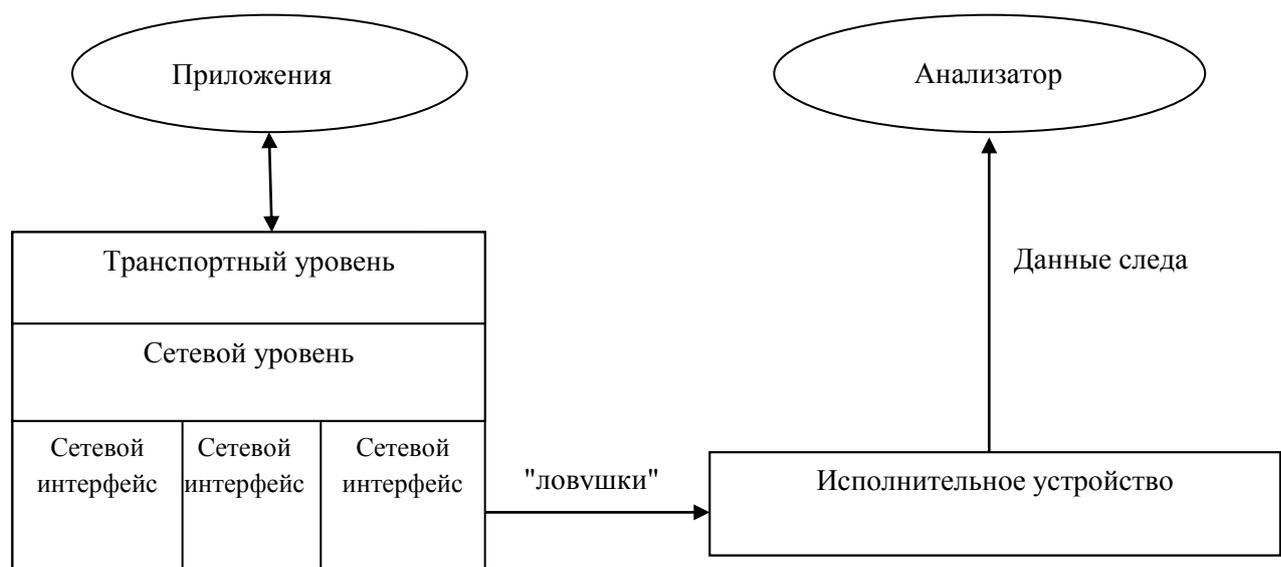


Рисунок 5.1 – Сбор наблюдений о сети «ловушки»

Влияние скорости передачи. Из-за асимметричного характера большинства беспроводных сетей каждое направление связи отслеживается независимо. Анализ проведенных измерений показал, что базовая станция может посылать большие пакеты (более 1000 байт) в пользовательском протоколе данных, при максимальной скорости передачи около 1,6 Мбит/с.

Для оценки влияния скорости передачи при измерениях использовались потоки данных со скоростями от 0,8 до 1,6 Мбит/с. Размер пакета и расстояние выбирались фиксированными и равными 1400 байт и около 150 м соответственно. Каждая точка данных на рисунке 5.2, представляет отдельную 1000-секундную запись (след). Рисунок показывает небольшую корреляцию между вероятностью ошибки пакета и скоростью передачи. Поскольку более высокая скорость передачи не приводит к существенному увеличению вероятности ошибки, для выделения большего числа канальных ошибок будем использовать скорости передачи, близкие к максимальным.

Влияние размера пакетов. Схожий эксперимент проводился для проверки влияния размера пакетов на вероятность ошибки. В эксперименте скорость передачи удерживалась постоянной равной 1,5 Мбит/с, тогда как размер пакетов изменяется от 100 до 1400 байт. Для предотвращения фрагментации, размер пакетов выбирался так, чтобы он был меньше максимально допустимого блока передачи равного 1500 байт.

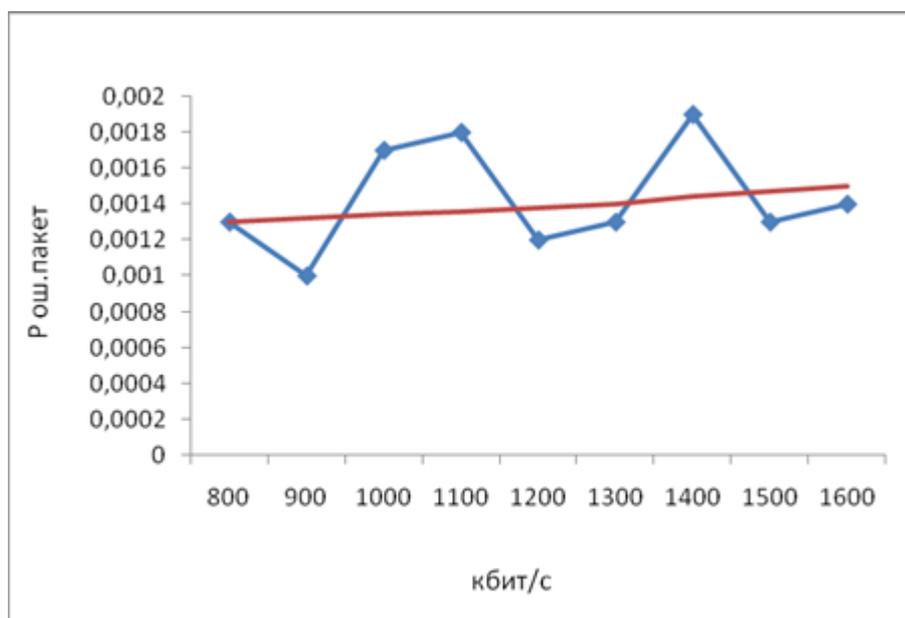


Рисунок 5.2 – Вероятность пакетных ошибок в зависимости от скорости передачи

Результирующие вероятности ошибки пакета изображены на графике (рисунок 5.3). Так как точки на графике лежат на прямой линии, можно заключить, что вероятность ошибки пакета увеличивается экспоненциально при увеличении размера пакета (поскольку график нарисован в логарифмическом масштабе по одной оси). Анализ показывает, что

вероятность ошибки пакета удваивается при каждом увеличении размера пакета на 300 байт.

Влияние расстояния. Другим параметром, который, в общем случае сильно коррелирован с уровнем сигнала и вероятностью ошибки, является расстояние между передатчиком и приемником. Поскольку в свободном пространстве мощность электромагнитного излучения меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, что делает расстояние идеальным индикатором уровня сигнала так же, как и вероятность потерь. Однако на практике, не идеальные условия распространения могут сделать это соотношение бесполезным.

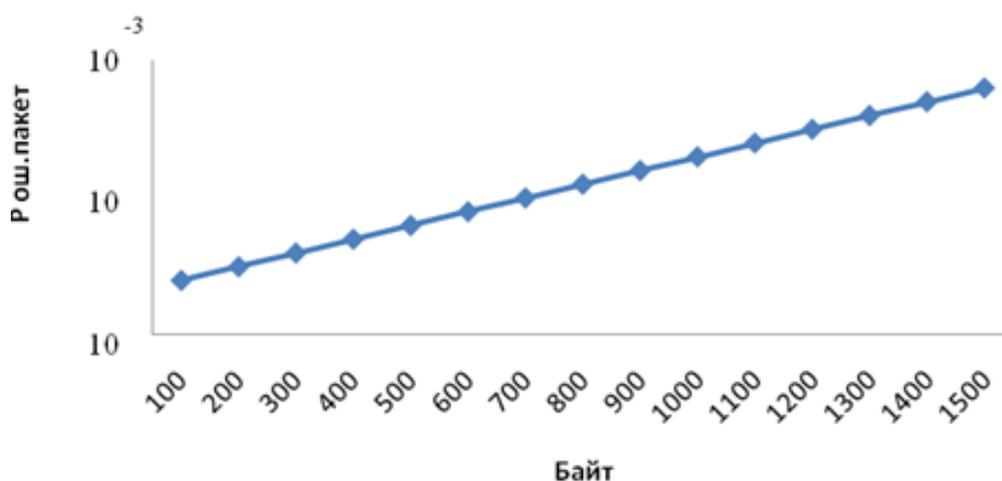


Рисунок 5.3 – Вероятность пакетных ошибок в зависимости от размера пакетов

На рисунке 5.4 показана вероятность ошибки пакетов, измеренная на различных расстояниях.

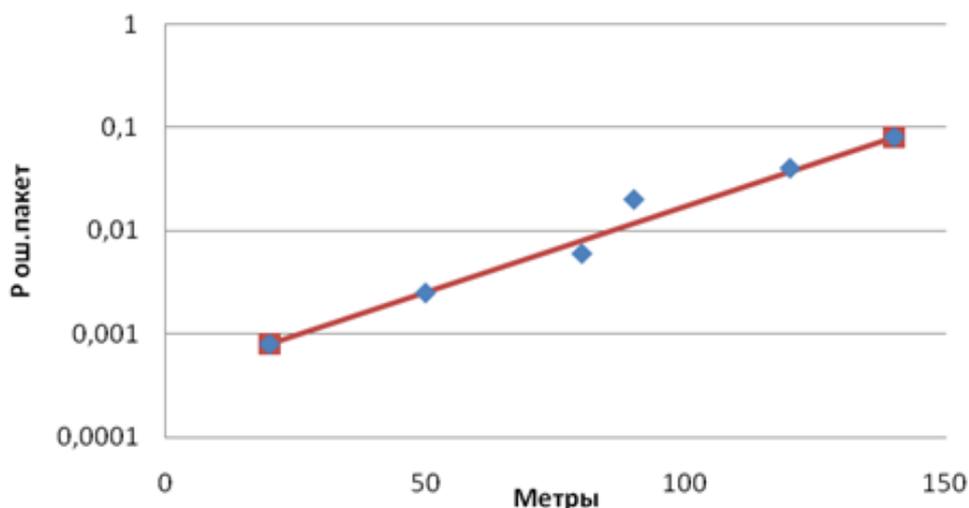


Рисунок 5.4 – Вероятность пакетных ошибок в зависимости от расстояния

Каждая точка данных получена в результате передачи пользовательского протокола данных общим размером 10^8 байт через три 1000-секунд интервала. Из графика видно, что вероятность ошибки пакетов является экспоненциальной функцией расстояния.

Таблица 5.2 объединяет данные экспериментов по изменению расстояния и содержит средние значения и дисперсии трех основных характеристик ошибки пакетов: вероятность ошибки, длину ошибки, длина безошибочного интервала. Столбец «среднее» содержит усреднение данных, собранных для всех расстояний. Данные в строке «мобильный пользователь» собраны в то время, когда участник эксперимента перемещался со скоростью около 1.5 м/сек. Вероятность ошибки пакетов для этого случая примерно на 30% выше, чем средняя, предположительно из-за мобильности.

Т а б л и ц а 5.2 – Параметры наблюдаемых последовательностей на различных расстояниях

| Расстояние, м | Вероятность пакетной ошибки | | Длина ошибочного блока | | Длина безошибочного блока | |
|------------------------|-----------------------------|-----------|------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | среднее | дисперсия | среднее | дисперсия | среднее | дисперсия |
| 10 | 0,000634 | 0,000229 | 1,000 | 0,000 | 1749,59 | 732,72 |
| 40 | 0,001955 | 0,000725 | 1,848 | 0,227 | 1023,43 | 334,40 |
| 70 | 0,003271 | 0,001086 | 2,005 | 0,210 | 574,56 | 148,45 |
| 90 | 0,021822 | 0,010412 | 2,428 | 0,018 | 122,89 | 58,99 |
| 110 | 0,032171 | 0,014786 | 2,540 | 0,482 | 87,26 | 39,75 |
| 130 | 0,080431 | 0,037123 | 2,298 | 0,290 | 28,90 | 8,82 |
| усреднение | 0,024735 | 0,031554 | 2,054 | 0,564 | 549,37 | 699,39 |
| мобильный пользователь | 0,032711 | 0,019324 | 2,365 | 0,089 | 84,60 | 37,36 |

Длина пачки ошибок определена как число пакетов, которые потеряны последовательно. Точно так же длина безошибочного интервала - это число пакетов, которое принято успешно между двумя соседними пачками ошибок. Эту величину можно также перевести в интервалы времени между поступлениями ошибок. Средняя длина ошибки составляет от 2 до 3 пакетов для большинства анализируемых расстояний. Среднее длины без ошибок для различных расстояний меняется в пределах двух порядков по величине и имеет большую стандартную дисперсию.

Заключение

Магистерская диссертация посвящена исследованию интегрированных сетей связи. Исследование заключалось в анализе существующих каналов связи и выборе необходимых для получения высокого качества обслуживания в интегрированной сети связи. Правильность выбора подтверждена теоритеским расчетом.

В первой главе освещен вопрос постановки задачи на исследование интегрированных сетей связи.

Во второй главе осуществляется анализ состояния проблемы передачи потоковых сервисов в широкополосных системах беспроводного доступа.

В третьей главе проведено исследование характеристик потокового трафика и разработана математическая модель функционирования систем беспроводного.

В четвертой главе проведена оценка качества передачи потоковых данных в широкополосных системах беспроводного доступа. Оценено влияние скорости передвижения терминала пользователя на помехоустойчивость, а так же на помехоустойчивость технологии ММО.

В пятой главе поведен эксперимент используемого оборудования в действующей интегрированной сети связи компании ТОО «Eventis Telecom Kazakhstan». Эксперимент проводился в течение 10 дней при равной пропускной способности спутникового и оптического канала (2048 Кбит/сек) и при уменьшении пропускной способности оптического канала в два раза (1024 Кбит/сек). В процессе эксперимента проведены измерения объема трафика и скорости передачи. Схема используемой интегрированной сети (приложение В). Результат показал, что уменьшение пропускной способности отдельного канала в интегрированной сети существенно ухудшает качество обслуживания передачи данных.

Таким образом, из проведенного исследования следует вывод, что при разработке интегрированной сети для передачи различной информации необходимо учитывать параметры всех участков сети и их влияние на осуществление устойчивой связи.

Перечень сокращений

GEO (Geostationary Earth Orbit) – геостационарная орбита
MEO (Medium Earth Orbit) – средневысотные круговые орбиты
LEO (Low Earth Orbit) – низкие круговые орбиты
VSAT (Very Small Aperture Terminal) – малые спутниковые наземные станции
НИИ (National information infrastructure) – национальная Информационная Структура
PC (Personal computer) – персональный компьютер
ARQ (Automatic Repeat Request) – каналы с обратной связью
WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – мировой стандарт для микроволнового доступа
RMTP (Reliable Multicast Transport Protocol) – протокол надежной групповой доставки
IN (Intelligent network) – интеллектуальная сеть
NGN (Next Generation Network) – сети следующего поколения
WAN (Wide area networks) –глобальные сети
WLL (Wireless Local Loop) –беспроводной абонентский шлейф
Wi-Fi (Wireless Fidelity) – беспроводная точность
LAN (Local area networks) – локальные сети

Список литературы

- 1 Артющенко В.М., Шелухин О.И., Афонин М.Ю. Цифровое сжатие видеoinформации и звука: Учебное пособие/ Под ред. В.М. Артющенко. - М.: "Дашков и Ко", 2003.
- 2 Kozamernik, V. Steinmann, P. Sunna, E. Wyckens "SAMVIQ - A New EBU Methodology For Video Quality Evaluations in Multimedia".
- 3 Feamster N. and Balakrishnan H., Packet Loss Recovery for Streaming Video, 12th International Packet Video Workshop, Apr. 2002. Sect. C (3), July-September 2008, pp. 9-16.
- 4 IEEE802.16, part 11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High Speed Physical Layer in the 5GHz Band, P802.11a/D7.0, July 1999.
- 5 В.С.Сюваткин, В.И.Есипенко, И.П.Ковалев, В.Г.Сухоробров WiMAX - технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применения / под. Ред В.В.Крылова- СПб.: БХВ-Петербург, 2005 - 368 с.
- 6 Dai M. and Loguinov D. Analysis and modeling of MPEG-4 and H.264 multi-layer video traffic, in Proceedings of IEEE INFOCOM, Miami, FL, Mar. 2005.
- 7 Арсеньев А.В. Динамика качества каналов беспроводного доступа с многолучевыми замираниями при пакетной коммутации. «Электротехнические и информационные комплексы и системы» №1 2009 г., стр.53-57
- 8 Окулов К.Ю., Персгняк А.Е., Арсеньев А.В. Сравнительный анализ результатов моделирования трафика на основе различных ветвей-моделей. «Электротехнические и информационные комплексы и системы», 2008 г., стр.46-51
- 9 Шелухин О.И., Арсеньев А.В. Фоминский В.Ю. Алгоритм оценки вероятности пакетирования ошибок в каналах связи систем беспроводного доступа с подвижными объектами. Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса» №1(8) 2009 , стр. 70-77
- 10 <http://trace.eas.asu.edu/index.html>
- 11 <http://www.tcpdump.org>
- 12 <http://windump.polito.it>
- 13 <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/iw.html>
- 14 Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. М.: Радио и связь, 2002.
- 15 Aguiar A. C., Hoepf C., Klaue J., Karl H., Wolisz A., and Miesmer H. Channel-aware schedulers for voip and MPEG-4 based on channel prediction, to be published at MoMuC, 2003.
- 16 Ахметшин Р.Р., Арсеньев А.В., Персгняк А.Е. Моделирование телекоммуникационного трафика с использованием мультифрактальной ветвей-модели «Электротехнические и информационные комплексы и системы», 2008 г., стр.52-59

17 Арсеньев А.В. Оценка поведения беспроводных каналов, на основе слежения за статистическими характеристиками качества связи. «Вестник ассоциации вузов туризма и сервиса» №1(8) 2009, стр. 63-69

18 Арсеньев А.В., Фоминский В.Ю., Симонян А.Г. Оценка фрактальных свойств телекоммуникационного трафика в сети широкополосного доступа WiMAX. «Электротехнические и информационные комплексы и системы» №1 2009 г., стр.48-52

19 Stephen Wolf, and Margaret H. Pinson, "Spatial-temporal distortion metrics for inservice quality monitoring of any digital video system", Proc. of SPIE International Symposium on Voice, Video, and Data Communications, Boston, MA, September 11- 22, 1999.

20 T. Alpert, V. Baroncini, D. Choi, L. Contin, R. Koenen, F. Pereira, Ii. Peterson, "Subjective Evaluation of MPEG-4 Video Codec Proposals: Methodological Approach and Test Procedures".

21 Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем./ Под ред. О.И. Шелухина-М.: Сайнс-Пресс., 2005.

22 Жунусов К.Х., Овсянников В.А. Влияние помехоустойчивости широкополосных систем беспроводного доступа IEEE 802.16 на качество передачи потокового трафика. «Поиск - международный научный журнал-приложение Республики Казахстан» №4(1) 2013, с. 221-225