

**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: Анализ параметров интегрированных сетей связи в зависимости от  
состава сетей

Выполнил Утегалиев Д. Ж. \_\_\_\_\_ Группа МТСП-12-2  
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель д.ф.м.н. проф. каф. ТКС \_\_\_\_\_ Козин И.Д.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(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 БМ071900 – Радиотехника, электроника и телекоммуникации

---

Кафедра Телекоммуникационных систем

---

### ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Утегалиеву Даурену Жайлаубаевичу

Тема диссертации «Анализ параметров интегрированных сетей связи в зависимости от состава сетей»

утверждена Ученым советом института приказом №\_\_\_ от «\_\_» 201\_\_ г.

Срок сдачи законченной диссертации « » января 2014 г.

Цель исследования исследовать влияние пропускных способностей наземного и спутникового канала на скорость передачи и объем трафика в интегрированных сетях связи.

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

1 Обзор интегрированных сетей связи;

2 Анализ способов объединения спутниковых и наземных каналов для организации интегрированной сети связи;

3 Расчет энергетического бюджета спутникового канала и характеристик оптической линии связи.

4 Исследование параметров скорости передачи каналов при разных пропускных способностях спутникового и оптического канала связи.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей) 1 Структурная схема интегрированной сети ТОО «Eventis Telecom Kazakhstan» 2 Графики зависимости объема трафика, скорости передачи при разной пропускной способности спутникового и оптического канала связи.

Рекомендуемая основная литература

1 Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие. - М.: Альпина Паблишер, 2004.

2 Спутниковая связь и вещание. Коллектив ООО «Гротеск».

3 Конин В.В. Спутниковые системы и технологии. – М.: Оборонгиз, 2002.

4. <http://news.ferra.ru/soft/2009/07/03/88507/>

## ГРАФИК

### подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
<i>1 Изучение интегрированных сетей связи. Виды.</i>	5.03.12	<i>Выполнил</i>
<i>2. Разработка функциональной схемы организации передачи речи в интегрированных сетях с использованием технологий IP-телефонии</i>	15.10.12	<i>Выполнил</i>
<i>3 Проведение экспериментов по передаче речевых данных интегрированной сети с разными пропускными способностями спутниковых и наземных каналов</i>	15.02.13	<i>Выполнил</i>
<i>4 Расчет энергетического бюджета спутникового канала связи.</i>	15.07.13	<i>Выполнил</i>
<i>5 Расчёт характеристик оптической линии связи.</i>	15.10.13	
<i>6 Обобщение результатов.</i>	10.11.13	<i>Выполнил</i>

Дата выдачи задания 3 сентября 2012 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Коньшин Сергей Владимирович  
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации \_\_\_\_\_ Козин Игорь Дмитриевич  
подпись (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант \_\_\_\_\_ Утегалиев Даурен Жайлаубаевич  
подпись (Ф.И.О.)

## **Андатпа**

Осы магистірлік диссертацияда бірнеше тармақтардан орындалған. Жергілікті және спутниктік ақпарат берудің негізгі қасиеттері, артықшылықтары және кемшіліктері сипатталып, тасымалдау орталықтарының салыстырылуы өткізілді. Одан әрі интеграцияланған байланыс желілерінің сипаттамасы қарастырылып, оны қолданудың негізгі қасиеттері және спутниктік арналардың негізіндегі интеграцияланған желілердің бірнеше түрі келтірілген.

Спутникті каналдардың санына байланысты, интеграцияланған желінің кідірісі теориялық түрде есептелген. Есептеудің нәтижесі бойынша кідірістің бөлек каналдарға қызмет көрсету қарқындылығына тәуелділік графигі көрсетілген.

## **Аннотация**

Данная магистерская диссертация посвящена исследованию особенностей построения интегрированных сетей связи, зависимости параметров загрузки каналов от пропускной способности каналов связи, используемых для организации интегрированной сети связи:

Проведен обзор наземных и спутниковых линий связи с перечнем их основных характеристик, недостатков и достоинств. Осуществлен выбор необходимых каналов связи для организации системы передачи данных компании ТОО «Eventis Telecom Kazakhstan» и исследованы параметры передачи трафика в зависимости от разной пропускной способности каналов связи. Рассчитаны основные характеристики спутникового и оптического канала связи.

## **Abstract.**

This Master's dissertation is devoted to the study of similarities of building integrated networks, the dependency of boot channel parameters from the bandwidth capacity of communication channels that are used for the organization of an integrated communications network:

There was conducted a review of terrestrial and satellite links with a list of their main characteristics, benefits and weaknesses. Moreover, the necessary choice of communication channels for data transmission of LLP «EventisTelecomKazakhstan» system organization was done and traffic parameters were also investigated depending on different bandwidth capabilities of communication channels. The main characteristics of the optical and satellite communication channel were calculated.

## Содержание

Введение.....	6
1 Интегрированные сети связи .....	7
1.1 Современное состояние интегрированных систем связи (ИСС) .....	7
1.2 Использование интегрированных сетей .....	7
1.3 Виды транспортных сетей связи, использующихся в интегрированных сетях связи.....	8
1.3.1 Оптические каналы связи.....	8
1.3.1.1 Преимущества оптических линий связи .....	8
1.3.1.2 Недостатки оптических линий связи.....	100
1.3.2 Спутниковые системы связи .....	111
1.3.2.1 Достоинства спутниковых систем связи.....	111
1.3.2.2 Недостатки спутниковых систем связи.....	122
1.3.3 Кабельные системы.....	133
1.3.3.1 Витая пара.....	133
1.3.3.2 Коаксиальный кабель .....	155
1.3.4 Радиорелейная связь .....	155
1.3.4.1 Достоинства радиорелейной связи .....	166
1.3.4.2 Недостатки радиорелейной связи .....	177
1.3.5 Выбор транспортной системы для магистральных сетей.....	188
1.4 Виды интегрированных сетей связи.....	188
1.5 Требования, предъявляемые к современным сетям связи .....	200
1.6 Теоретическое обоснование объединения наземных и спутниковых систем связи .....	211
2 Теоретический расчет .....	277
2.1 Энергетический бюджет спутниковых линий связи .....	277
2.1.1 Расчет энергетического бюджета ЗС – ГСР .....	28
2.1.2 Расчет энергетического бюджета каналов связи ГСР-ЗС .....	344
2.1.3 Отношение сигнала-шум на входе ЗС при работе в дожде .....	348
2.2 Расчет характеристик оптического волокна.....	40
2.2.1 Расчет апертуры .....	40
2.2.2 Расчет взаимных влияний в оптическом кабеле.....	466
2.2.3 Расчет дисперсии.....	48
3 Экспериментальная часть.....	51
3.1 Расчет математического ожидания и дисперсии .....	62
Заключение .....	64
Перечень сокращений .....	65
Список литературы .....	66
Приложение А Результаты обработки графиков .....	68
Приложение Б Расчет взаимных влияний в кабеле .....	69
Приложение В Схема организации сети Eventis Telecom KZ .....	70
Приложение Г Расчет $M(x)$ и $D(x)$ в Excel.....	71

## Введение

На данный момент перед операторами связи стоит задача не просто передавать голос или видео, а обеспечивать стабильную связь и доступ к услугам пользователей, в каких бы точках мира они не находились. Вследствие чего, все больше провайдеров связи используют интегрированные сети, в которые входят различные транспортные системы: спутниковые, кабельные, оптические, радиорелейные. Наряду с количественным увеличением частотного и временного ресурсов, в интегрированных системах эти ресурсы наиболее эффективно используются за счет появляющейся возможности применения динамического управления информационными потоками. Для пользователей интегрированные сети связи предоставят помимо широкого спектра услуг, высокую скорость передачи данных, индивидуальность (услуги доступны в любое время в необходимом объеме и формате предоставления контента), доступность (приемлемая цена сочетается с гибкостью в выборе типа используемого оборудования).

Интеграция систем связи, как бы это ни казалось привлекательным с первого взгляда, задача не простая. Более того, при неправильном объединении различных систем могут быть достигнуты абсолютно противоположные результаты, т.е. вместо улучшения основных показателей сетей связи в результате будут получены худшие характеристики. Поэтому при разработке любой интегрированной сети необходимо учитывать возможные минусы объединения разных транспортных сред, такие как задержки, не совместимость методов кодирования и модуляции.

Для организации современных интегрированных сетей необходимо проводить анализ и расчет каждого участка сети, определять вносимую им задержку, ширину полосы пропускания, минимальную, максимальную скорость передачи, возможный передаваемый объем информации и др.

В связи с этим в данной работе будут рассмотрены основные методы анализа интегрированных сетей, представлена математическая модель, на базе которой можно получить основные характеристики сети и сделать вывод об эффективности работы интегрированной системы. Также проведен ряд экспериментов с помощью программы анализа трафика «Net Flow», которая отражает основные показатели эффективности работы систем связи.

## **1 Интегрированные сети связи**

### **1.1 Современное состояние интегрированных систем связи (ИСС)**

В настоящее время внутри произвольных регионов (областей, стран, континентов) и между регионами инфраструктура телекоммуникаций распределяется существенно неравномерно. Это объясняется как географическими условиями, так и уровнем экономического развития этих регионов. В результате карта мира представляет собой, с телекоммуникационной точки зрения, совокупность множества островов, мегаполисов, развитых регионов, стран, которые имеют в своем составе развитую телекоммуникационную структуру, изобилующую широкополосными сетями связи для предоставления широкого спектра услуг (Европа, Северная Америка). Между такими регионами существует потребность в широкополосной связи и в телекоммуникационных услугах. Есть и множество белых пятен, в которых аналогичная структура плохо развита, а зачастую и просто отсутствует (Азия, Африка). Организовать предоставление современных услуг связи в таких регионах возможно несколькими путями [1]:

- создать инфраструктуру путем прокладки наземных широкополосных каналов связи. У оптоволоконна масса положительных качеств - он не подвержен внешним помехам, не боится сырости, не окисляется и не корродирует. Кроме того, у него очень низкий уровень потерь - до 0.1 дБ/км. Но следует учитывать, что прокладка и реализации требует длительного времени и денег;

- организовать спутниковые каналы связи, что существенно сокращает сроки начала предоставления услуг связи на первом этапе информатизации регионов, причем при приемлемой стоимости их реализации. На последующих же этапах развития телекоммуникационной инфраструктуры этих регионов спутниковые системы связи можно использовать с целью резервирования наземных сетей связи.

Таким образом при построение сетей необходимо учитывать все недостатки каждого вида сетей, и учитывать их влияние на производительность системы вообще. Для этого при проектирование следует учитывать - на каких - то участках магистралей необходимо организовывать назмные каналы, а где-то следует использовать спутниковые или радиорелейные каналы.

### **1.2 Использование интегрированных сетей**

В связи с разразившейся информационной революцией во всем мире встала проблема изменения инфраструктуры информационных сетей. Сейчас вполне очевидно, что отдельные системы коммуникаций постепенно отживают свой век и будущее за универсальными структурами, объединяющие

транспортный механизм передачи информации, учитывающего специфику всех включенных в сеть информационных потоков. Ситуация осложняется в тех случаях, когда интегрированные сети создаются на базе уже существующих локальных сетей, которые, как правило, строились независимо друг от друга, на совершенно различном оборудовании. Транспортные механизмы должны быть совместимы с протоколами, используемыми в объединяемых сетях.

Необходимость в интегрированных сетях очевидно, только благодаря им появляется возможность объединить все существующие телекоммуникационные структуры.

Интегрированные сети могут объединять в себе сети на базе спутниковых каналов, оптике, кабельных, радиорелейных каналов.

### **1.3 Виды транспортных сетей связи, использующихся в интегрированных сетях связи**

#### **1.3.1 Оптические каналы связи**

Оптическая линия связи - это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием "оптическое волокно". Оптическая сеть - это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии связи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей [2].

Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий связи является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне.

##### **1.3.1.1 Преимущества оптических линий связи**

Оптика обладает следующими положительными характеристиками:

а) широкая полоса пропускания - обусловлена чрезвычайно высокой частотой несущей 1,014 кГц. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду. Большая полоса пропускания - это одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации;

б) малое затухание светового сигнала в волокне. Выпускаемое в настоящее время отечественными и зарубежными производителями промышленное оптическое волокно имеет затухание 0,2-0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм в расчете на один километр. Малое затухание и небольшая



дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью до 100 км и более;

в) низкий уровень шумов в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания, путем передачи различной модуляции сигналов с малой избыточностью кода;

г) высокая помехозащищенность. Поскольку волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т.д.). В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущей многопарным медным кабелям;

д) малый вес и объем. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность. Например, 900-парный телефонный кабель диаметром 7,5 см, может быть заменен одним волокном с диаметром 0,1 см. Если волокно "одеть" в множество защитных оболочек и покрыть стальной ленточной броней, диаметр такого ВОК будет 1,5 см, что в несколько раз меньше рассматриваемого телефонного кабеля;

е) высокая защищенность от несанкционированного доступа. Поскольку ВОК практически не излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приема-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить "взламываемый" канал связи и подать сигнал тревоги. Сенсорные системы, использующие интерференционные эффекты распространяемых световых сигналов (как по разным волокнам, так и разной поляризации) имеют очень высокую чувствительность к колебаниям, к небольшим перепадам давления. Такие системы особенно необходимы при создании линий связи в правительственных, банковских и некоторых других специальных службах, предъявляющих повышенные требования к защите данных. Рассмотрение волоконно-оптических сенсорных систем выходит за рамки материала данной книги;

ж) гальваническая развязка элементов сети. Данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно помогает избежать электрических "земельных" петель, которые могут возникать, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках здания, например на разных этажах. При этом может возникнуть большая разность потенциалов, что способно повредить сетевое оборудование. Для волокна этой проблемы просто нет;

з) взрыво- и пожаробезопасность. Из-за отсутствия искрообразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических,

нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска;

и) экономичность. Волокно изготовлено из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди. В настоящее время стоимость волокна по отношению к медной паре соотносится как 2 к 5. При этом ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции. Количество повторителей на протяженных линиях сокращается при использовании ВОК. При использовании солитонных систем передачи достигнуты дальности в 4000 км без регенерации (то есть только с использованием оптических усилителей на промежуточных узлах) при скорости передачи выше 10 Гбит/с;

к) длительный срок эксплуатации. Со временем волокно испытывает деградацию. Это означает, что затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 25 лет. За это время может смениться несколько поколений/стандартов приемо-передающих систем;

л) удаленное электропитание. В некоторых случаях требуется удаленное электропитание узла информационной сети. Оптическое волокно не способно выполнять функции силового кабеля. Однако, в этих случаях можно использовать смешанный кабель, когда наряду с оптическими волокнами кабель оснащается медным проводящим элементом. Такой кабель широко используется как в России, так и за рубежом [3].

Из чего следует, что оптические линии связи являются наиболее оптимальным решением для сетей, где на первом месте стоит качество, скорость и надежность.

### 1.3.1.2 Недостатки оптических линий связи

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации волоконно-оптические системы имеют также и недостатки, главным образом из-за дороговизны прецизионного монтажного оборудования и надежности лазерных источников излучения [4]. Многие из недостатков вероятнее всего будут нивелированы с приходом новых конкурентоспособных технологий в волоконно-оптические сети:

а) стоимость интерфейсного оборудования. Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические передатчики и приемники остается пока еще довольно высокой. При создании оптической линии связи также требуются высоконадежное специализированное коммутационное пассивное оборудование, оптические соединители с малыми потерями и большим ресурсом на подключение-отключение, оптические разветвители, аттенюаторы;

б) монтаж и обслуживание оптических линий. Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий связи

также остается высокой. Если же повреждается волоконно оптический кабель (ВОК), то необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды. Производители тем временем поставляют на рынок все более совершенные инструменты для монтажных работ с ВОК, снижая цену на них;

в) требование специальной защиты волокна. Стекло как материал выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1ГПа (109 Н/м<sup>2</sup>). Это казалось бы означает, что волокно в единичном количестве с диаметром 125 мкм выдержит вес гири в 1 кг. К сожалению, на практике это не достигается. Причина в том, что оптическое волокно, каким бы совершенным оно не было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготовлении покрывается специальным лаком на основе эпоксиакрилата, а сам оптический кабель упрочняется, например нитями на основе кевлара (kevlar). Если требуется удовлетворить еще более жестким условиям на разрыв, кабель может упрочняться специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Но все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля.

Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, дальнейшие перспективы развития технологии волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в информационных сетях более чем очевидны.

### 1.3.2 Спутниковые системы связи

Спутниковая связь — один из видов радиосвязи, основанный на использовании искусственных спутников земли в качестве ретрансляторов. Спутниковая связь осуществляется между земными станциями, которые могут быть как стационарными, так и подвижными.

Спутниковая связь является развитием традиционной радиорелейной связи путем вынесения ретранслятора на очень большую высоту (от сотен до десятков тысяч км). Так как зона его видимости в этом случае - почти половина Земного шара, то необходимость в цепочке ретрансляторов отпадает в большинстве случаев достаточно и одного [5].

#### 1.3.2.1 Достоинства спутниковых систем связи

Спутниковая связь обладает важнейшими достоинствами, необходимыми для построения крупномасштабных телекоммуникационных сетей [6]:

а) с помощью спутниковых систем связи (ССС) можно достаточно быстро сформировать сетевую инфраструктуру, охватывающую большую территорию и не зависящую от состояния наземных каналов связи;

б) использование современных технологий доступа к ресурсам спутников ретрансляторов и возможность одновременной доставки

информации практически неограниченному числу пользователей значительно снижают затраты на создание и эксплуатацию сети;

в) по одному и тому же каналу можно передавать разнородную информацию (голос, данные, изображения, приложения) непосредственно в любую периферийную точку сети. Эти достоинства спутниковой связи делают её весьма привлекательной и высокоэффективной даже в регионах с хорошо развитыми телекоммуникациями.

В развитых странах существует устойчивая тенденция роста загородных поселков для финансово обеспеченных слоев общества, которые являются потребителями самых современных услуг связи и готовы платить за эти услуги. Более того, многие компании с территориально-распределенной структурой крайне заинтересованы в снижении затрат на оплату услуг связи и все чаще отказываются от сетей общего пользования, предпочитая создавать собственные более экономичные спутниковые сети связи. Современный рынок услуг ССС изобилует широким спектром технических решений для построения такого рода сетей. В то же время в развивающихся странах усиливаются процессы урбанизации и роста численности городов. Содействие проникновению передовых телекоммуникационных технологий в развивающиеся страны может стать долговременной стратегией, которая позволит демократизировать общество этих стран. Для этого владельцы некоторых ССС предоставляют местным правительствам возможность полностью контролировать земные станции, которые планируется расположить на территории их государств, и не обязуются поставлять услуги связи напрямую конечным пользователем, что могло бы быть расценено этими правительствами как угроза государственным интересам. Все это в совокупности с успехами в области микроэлектроники, создания новых дешевых стартовых комплексов и ракетносителей, а также положительным опытом быстрого развертывания мощных группировок ССС определяет необходимость и возможность широкого использования ССС.

#### 1.3.2.2 Недостатки спутниковых систем связи:

а) слабая помехозащищённость. Огромные расстояния между земными станциями и спутником являются причиной того, что отношение сигнал/шум на приемнике очень невелико (гораздо меньше, чем для большинства радиорелейных линий связи). Для того, чтобы в этих условиях обеспечить приемлемую вероятность ошибки, приходится использовать большие антенны, малозумящие элементы и сложные помехоустойчивые коды. Особенно остро эта проблема стоит в системах подвижной связи, так как в них есть ограничение на размер антенны и, как правило, на мощность передатчика;

б) влияние атмосферы. На качество спутниковой связи оказывают сильное влияние эффекты в тропосфере и ионосфере;

в) поглощение в тропосфере. Поглощение сигнала атмосферой находится в зависимости от его частоты. Максимумы поглощения приходятся

на 22,3 ГГц (резонанс водяных паров) и 60 ГГц (резонанс кислорода) [7]. В целом, поглощение существенно сказывается на распространении сигналов с частотой выше 10 ГГц (то есть, начиная с Ku-диапазона). Кроме поглощения, при распространении радиоволн в атмосфере присутствует эффект замирания, причиной которому является разница в коэффициентах преломления различных слоев атмосферы;

г) ионосферные эффекты. Обусловлены флуктуациями распределения свободных электронов. К ионосферным эффектам, влияющим на распространение радиоволн, относят мерцание, поглощение, задержку распространения, дисперсию, изменение частоты, вращение плоскости поляризации. Все эти эффекты ослабляются с увеличением частоты. Для сигналов с частотами, большими 10 ГГц, их влияние невелико;

д) сигналы с относительно низкой частотой (L-диапазон и частично C-диапазон) страдают от ионосферного мерцания, возникающего из-за неоднородностей в ионосфере. Результатом этого мерцания является постоянно меняющаяся мощность сигнала;

е) задержка сигнала. Проблема задержки распространения сигнала так или иначе затрагивает все спутниковые системы связи. Наибольшей задержкой обладают системы, использующие спутниковый ретранслятор на геостационарной орбите. В этом случае задержка, обусловленная конечностью скорости распространения радиоволн, составляет примерно 250 мс, а с учетом мультиплексирования, коммутации и задержек обработки сигнала общая задержка может составлять до 400 мс.

Задержка распространения наиболее нежелательна в приложениях реального времени, например, в телефонной связи. При этом, если время распространения сигнала по спутниковому каналу связи составляет 250 мс, разница во времени между репликами абонентов не может быть меньше 500 мс [6].

В некоторых системах (например, в системах VSAT, использующих топологию «звезда») сигнал дважды передается через спутниковый канал связи (от терминала к центральному узлу, и от центрального узла к другому терминалу). В этом случае общая задержка удваивается. Таким образом использование спутниковых линий связи является необходимым в труднодоступных участках, требующих быстрого развертывания, большой скорости передачи, и некритичных к задержкам.

### 1.3.3 Кабельные системы

#### 1.3.3.1 Витая пара

Витая пара - кабель, состоящий из одной или нескольких пар скрученных между собой медных изолированных проводников, заключенных в общую внешнюю оболочку. Их свивание между собой необходимо для уменьшения электромагнитных помех, исходящих из внешней среды, а также взаимных наводок во время передачи дифференциальных сигналов [8].

Неэкранированная витая пара, кстати, отличается низкой защищенностью от электромагнитных помех и от подслушивания. Перехватить информацию, передаваемую по сети, можно с помощью прямого контакта (например, используя 2 иглы, воткнутые в кабель). Бесконтактный же способ, заключается в радиоперехвате излучаемых кабелем электромагнитных полей. Поэтому, если вы заботитесь о конфиденциальности коммерческой информации, то лучше остановиться на экранированных кабелях.

В экранируемом кабеле каждая витая пара может находиться в индивидуальном металлической оплетке-экране, либо только в общем экране, либо оба варианта экранирования могут быть применены одновременно. Таким образом, снижаются как негативные воздействия извне, так и взаимное влияние пар друг на друга. Для защиты от помех подобному виду кабеля обязательно требуется заземление. Разумеется, стоит экранируемая витая пара значительно дороже неэкранируемой. Кроме того, при ее использовании необходимы специальные экранированные разъемы, розетки, патч-панели, коммутационные шнуры. Все это делает такой кабель менее популярным [9].

Благодаря своей структуре, витая пара обладает рядом отличительных черт, сделавших ее столь популярной на сегодняшний день.

Достоинствами витой пары является:

а) малая цена (витая пара зачастую дешевле коаксиального кабеля, не говоря уж об оптоволоконном);

б) гибкость. Благодаря высокой пластичности материала, витая пара гораздо удобнее для прокладки, особенно в городских условиях;

в) простота эксплуатации. Несложная конструкция разъемов на конце неэкранируемых кабелей облегчает процесс их монтажа, эксплуатации и ремонта;

г) использование разных технологий (Ethernet, Token Ring, стандартная телефония);

д) универсальность структурированной кабельной системы (скс) на базе витой пары позволяет использовать как разнообразное оборудование, так и разные типы сетевых протоколов;

е) удобство администрирования получаемой скс;

ж) администрирование и обслуживание скс на основе витой пары требует меньше трудовых затрат, чем устаревших моделей, что экономит ваши средства.

При всех достоинствах витая пара имеет ряд слабых мест, о которых важно помнить [10]:

а) уменьшение расстояний;

б) более сильное затухание сигнала, чем у коаксиального кабеля и низкая помехозащищенность сокращают длину линий связи на основе витых пар до 100 м;

в) необходимость коммутатора/концентратора. Похожая на звезду сеть на основе витой пары имеет в центре коммутатор. Им также может быть и

маршрутизатор. От него тянутся провода ко всем рабочим станциям. Приобретение головного центра требует определенных единовременных трат, которые, однако, быстро окупаются, благодаря сокращению текущих расходов.

В целом, необходимо заметить, что кабель на основе витой пары - основа любой современной локальной сети.

### 1.3.3.2 Коаксиальный кабель

Не так давно коаксиальный кабель был самым распространенным типом кабеля. Это объяснялось двумя причинами. Во-первых, он был относительно недорогим, легким, гибким и удобным в применении. А во-вторых, широкая популярность коаксиального кабеля привела к тому, что он стал безопасным и простым в установке [11].

Самый простой коаксиальный кабель состоит из медной жилы, изоляции, ее окружающей, экрана в виде металлической оплетки и внешней оболочки. Если кабель, кроме металлической оплетки, имеет и слой фольги, он называется кабелем с двойной экранизацией. При наличии сильных помех можно воспользоваться кабелем с учетверенной экранизацией. Он состоит из двойного слоя фольги и двойного слоем металлической оплетки.

Коаксиальный кабель более помехоустойчив, затухание сигнала в нем меньше чем в витой паре, поэтому его кабель можно использовать при передаче на большие расстояния и в тех случаях, когда высокоскоростная передача данных осуществляется на несложном оборудовании.

Главный недостаток коаксиальных кабелей их пропускная способность, которая не превышает 10 Мбит/с, что в современных сетях считается недостаточным. На самом деле ограничение здесь накладывает не сам коаксиальный кабель (полоса передачи коаксиальных кабелей очень велика, затухание же у хороших кабелей очень низкое), а сам физический протокол. Коаксиальный кабель, возможно, использовали бы и дальше, но есть две проблемы: первая, и самая существенная, точки доступа в такой сети расположены последовательно, и выход из строя одной из них приводит к неработоспособности всей сети, а вторая стоимость хорошего коаксиального кабеля существенно выше стоимости витой пары.

### 1.3.4 Радиорелейная связь

Радиорелейная связь по-прежнему остается важнейшей составной частью транспортных систем разного уровня – от ведомственных до международных [12].

Еще лет пятнадцать назад радиорелейная связь широко использовалась для реализации международных и национальных телекоммуникационных проектов. Достаточно сказать, что большинство междугородных каналов связи организовывались с использованием таких систем: в США – до 70

процентов, в странах Западной Европы – более 50 процентов, в Японии – примерно 50 процентов.

#### 1.3.4.1 Достоинства радиорелейной связи

Следует признать, что прежнее значение радиорелейной связи на магистральном уровне было утеряно – ее повсеместно вытесняет волоконно-оптическая связь [13].

Но не везде и не всегда. На относительно пустынных или неосвоенных, а также сложнорельефных территориях, в ряде случаев для дублирования отдельных участков оптики, как предтеча ВОЛС (при необходимости развернуть связь не дожидаясь завершения строительства оптических линий) и др., радиорелейная связь вполне достойно востребована на магистральном уровне и сегодня.

Новый импульс в своем развитии радиорелейная связь получила с развитием новых технологий связи, таких, как сотовая связь – мобильная и WLL, различных технологий радиодоступа для передачи данных и др. Именно эти технологии, требующие строительства огромного числа базовых станций и точек доступа, широко используют радиорелейную связь, как одно из самых эффективных (в части стоимости и скорости разворачивания) средств доставки трафика – к каждой базовой станции ВОЛС не проложишь. Экспертами здесь прогнозируется дальнейший рост значения и применений радиорелейной связи, особенно в свете развития широкополосного беспроводного доступа, происходящего в последнее время, в том числе на базе технологии WiMAX.

Радиорелейная связь остается незаменимой в своих традиционных областях применения, связанных либо с невозможностью использования других систем связи или нецелесообразностью по экономическим соображениям, либо по иным причинам – часто применение радиорелейной связи остается единственным средством, обеспечивающим передачу трафика.

Основными типовыми задачами, решаемыми с помощью этого вида оборудования, являются организация межсайтовых соединений, абонентских выносов, привязка к транспортным магистралям, построение технологических линий связи большой протяженности.

Спектр применения современной цифровой радиорелейной связи достаточно широк, что связано с особенностями разворачивания такой связи. В частности, оборудование радиорелейной связи позволяет оперативно наращивать возможности системы связи путем установки оборудования в помещениях узлов связи, используя антенно-мачтовые устройства и другие сооружения, что сокращает капитальные затраты на создание радиорелейных линий связи. Незаменимой является радиорелейная связь для организации многоканальной связи в регионах со слаборазвитой (или с отсутствующей) инфраструктурой связи, а также на участках местности со сложным рельефом, для разворачивания разветвленных цифровых сетей в регионах, больших городах и промышленных зонах, где прокладка новых кабелей слишком



дорога или невозможна. Весьма эффективна радиорелейная связь для восстановления связи в районах стихийных бедствий или при спасательных операциях и др.

В последние годы радиорелейная связь широко используется для построения ведомственных и корпоративных сетей, позволяя оперативно и эффективно обеспечивать связь между удаленными офисами, создавать системы управления и контроля, например, на нефтегазовых магистралях, обеспечивать связью месторождения и др.

Одним из относительно новых применений радиорелейной связи в последние годы стала реализация задач "последней мили" – с помощью радиорелейной связи абонентам предоставляются услуги голосовой телефонной связи, передачи данных (интернет), кабельного телевидения. Особенно эффективны такие применения в пригородных и сельских районах с недостаточной степенью проникновения современной телекоммуникационной инфраструктуры, коттеджных поселках и т. п. При этом, в зависимости от той или иной ситуации, радиорелейная связь может применяться для решения таких задач "последней мили", как отдельное самостоятельное звено при наличии в составе радиорелейного оборудования функционально законченных абонентских окончаний или в сочетании с оконечным мультиплексорным оборудованием или оборудованием АТС, а также в сочетании с другими средствами абонентского радиодоступа [14]. Некоторые основные преимущества радиорелейной связи перед проводной связью:

а) технологические:

- 1) оперативное развертывание с относительно небольшими затратами;
- 2) возможность организации многоканальной связи и передачи любых сигналов, как узкополосных, так и широкополосных;
- 3) нечувствительность к пересечениям радиорелейных линий связи с водными препятствиями или транспортными магистралями;
- 4) рациональная организация связи в труднодоступных местах;
- 5) поддержка разнообразной топологии, отвечающей корпоративной инфраструктуре: магистраль, звезда, дерево, кольцо;

б) ценовые:

- 1) стоимость 1 км РРЛ в десятки раз дешевле, чем ВОЛС;
- 2) высокая эксплуатационная рентабельность;
- 3) низкая стоимость эксплуатации, малочисленный эксплуатационный штат.

#### 1.3.4.2 Недостатки радиорелейной связи

Очевидный недостаток радиорелейных линий связи по сравнению с кабелями, как и недостаток радиосвязи вообще, - открытое распространение волн в окружающем пространстве и открытое расположение всех технических сооружений. Это обстоятельство может увеличивать возможность повреждения технических средств в некоторых ситуациях, а также снижает защищенность передаваемой информации от перехвата.

Отличительными недостатками радиорелейной связи является:

- а) необходимость обеспечения прямой геометрической видимости между антеннами соседних станций;
- б) необходимость использования высокоподнятых антенн;
- в) использование промежуточных станций для организации связи на большие расстояния, что является причиной снижения надежности и качества связи;
- г) громоздкость аппаратуры;
- д) сложность в строительстве радиорелейных линий в труднодоступной местности.

### 1.3.5 Выбор транспортной системы для магистральных сетей

Таким образом, из выше приведенных характеристик транспортных сетей можно сделать вывод, что оптимальным решением для построения магистральных сетей являются оптические каналы. Это объясняется хорошим качеством, защищенностью, большими скоростями, прочностью и большим сроком службы. Но учитывая, что прокладка оптики довольно дорогое решение, а также иногда нет возможности проложить ее в труднодоступных районах, спутниковые каналы могут заменить их. Они, во-первых, не уступают оптике в скорости передачи, во-вторых, имеют преимущество быстрого развертывания в любом месте. Также в роли магистральных линий можно использовать радиорелейную линию, но она имеет ряд существенных недостатков, таких как ненадежность, низкое качество, зависимость от погодных условий, громоздкость оборудования. Кабельные же сети намного ниже по цене оптики или спутникового канала связи, но они ограничены пропускной способностью каналов, поэтому их редко используют в качестве магистральных линий. Поэтому для организации связи между крупными локальными сетями, в которых необходимо организовать защищенный, высокоскоростной канал необходимо использовать оптические и спутниковые линии.

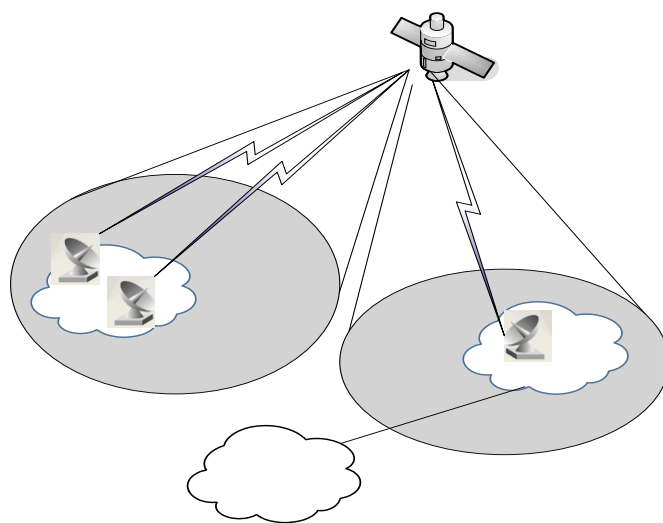
### 1.4 Виды интегрированных сетей связи

В качестве спутниковых сетей связи возможно использовать сети, построенные на базе геостационарных спутников-ретрансляторов (GEO), а также низко- и среднеорбитальных космических аппаратов (LEO, MEO) [15]. При использовании геостационарных спутников-ретрансляторов возможны два варианта построения ССС:

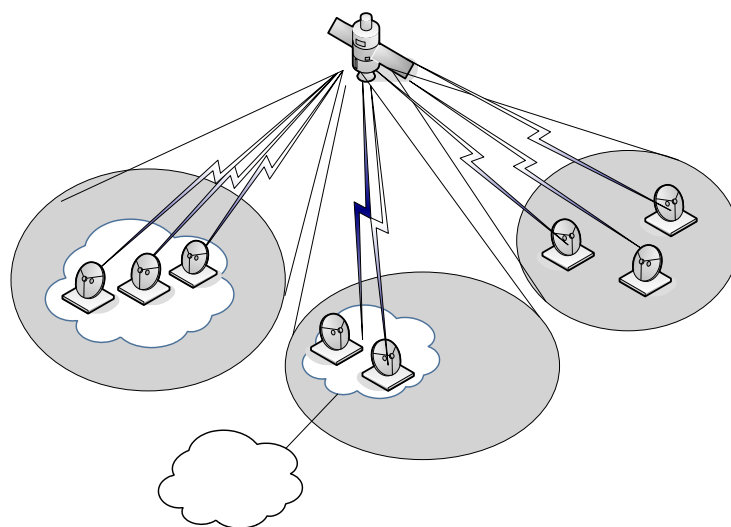
- с использованием наземного сегмента с мощными шлюзами ССС (рисунок 1а) для реализации линий связи с большой пропускной способностью;

- с использованием в наземном сегменте сети оборудования пользователей VSAT для реализации линий связи средней и малой пропускной способности (рисунок 1б).

Альтернативой двум предыдущим вариантам является ССС на базе низкоорбитальных ССС, по структурному построению очень похожая на два предыдущих варианта (рисунки 1а и 1б). Преимуществом этого варианта, с точки зрения реализации качества предоставления интегральных услуг связи, является обеспечение низкой задержки распространения сигналов. Для реализации интерактивного обмена (видеоконференцсвязь, мультимедиа, системы оперативного управления), который возможен только при обеспечении низких задержек распространения сигналов, необходимо использовать негеостационарные системы связи.



а) применение ГССС для связи между земными региональными станциями



б) применение ГССС для связи между VSAT-терминалами

Рисунок 1 – Построение ССС на базе геостационарных спутников-ретрансляторов

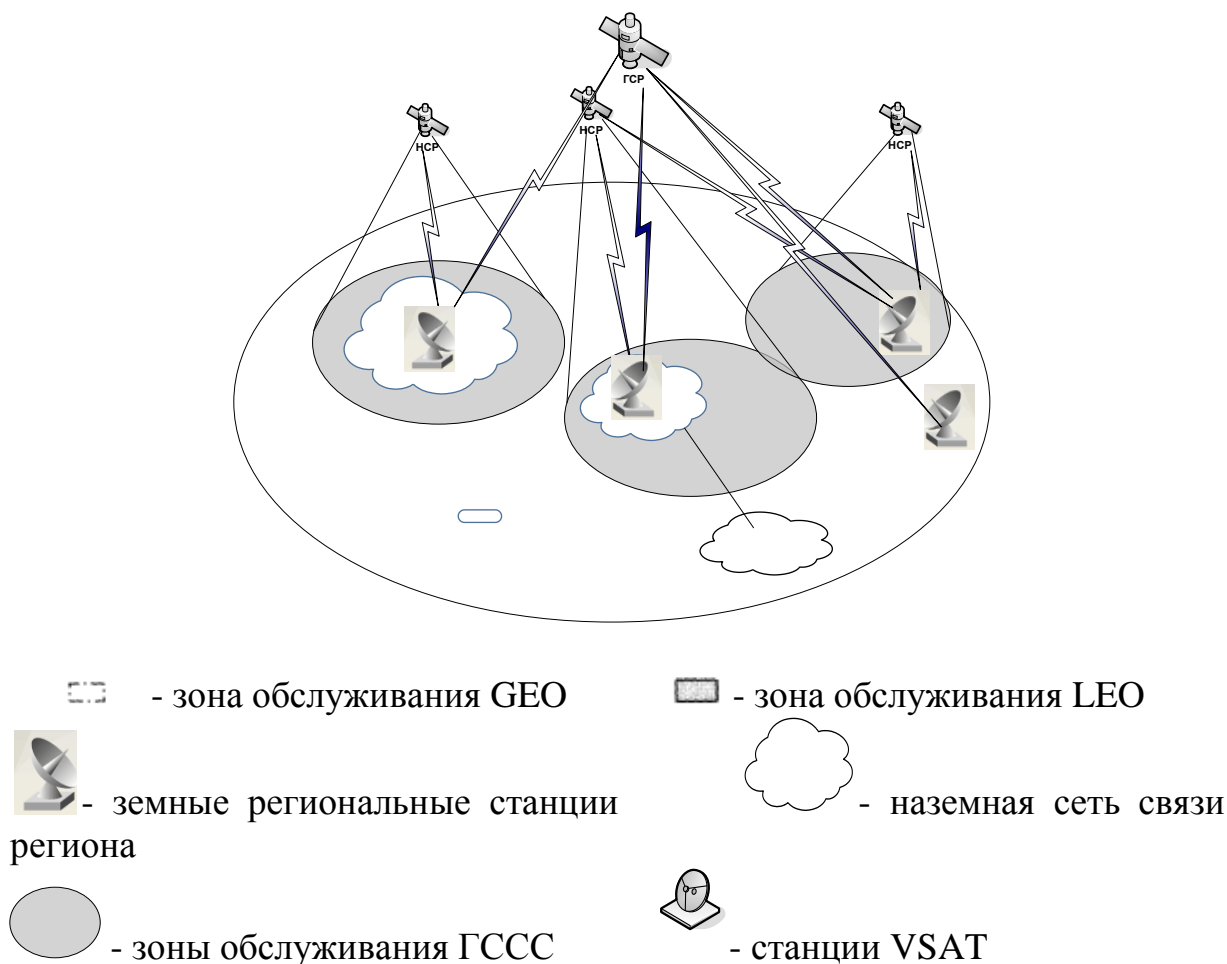


Рисунок 2 - Использование комбинированной сети связи на базе НССС и ГССС для внутри- и межрегиональной связи [15]

### 1.5 Требования, предъявляемые к современным сетям связи

Основными требованиями к современным сетям связи является качество и скорость. А также следует учитывать:

- требования к услугам связи разнородных пользователей непрерывно растут, более того, возникают новые требования, которые при проектировании систем связи либо не учитывались, либо были в разряде второстепенных (в частности, во много раз повысились требования к доступности услуг связи);

- спектр предоставляемых услуг связи непрерывно расширяется, а отдельные действующие системы или сети связи не в состоянии предоставить данные услуги;

- растет число и мобильность абонентов, их информационная активность, которая, в общем, существенно ухудшает показатели эффективности действующих систем и снижает качество услуг связи;

- в мире имеется тенденция к опережающему росту объемов передаваемой информации по сравнению с ростом валового продукта, причем эта зависимость нелинейная;

- каждая из систем связи и применяемая в них технология передачи информации имеет только вполне определенную область эффективного (в смысле выбранного критерия) применения, поэтому создание какой-то одной универсальной системы связи, которая бы предоставляла весь комплекс услуг связи, на сегодняшний день невозможно как по техническим, так и по экономическим причинам;

- загрузка отдельных каналов связи, сегментов и узлов сетей в течение суток существенно неравномерная;

- распределение пользователей по зоне охвата топологии систем и сетей связи существенно неравномерное;

- в настоящее время на большей части территории нашей планеты не могут быть предоставлены даже так называемые основные услуги связи;

- методология проектирования систем связи, как правило, основана на использовании некоторых усредненных вероятностных значений показателей качества, а не на их экстремальных значениях;

- некоторые виды систем связи в принципе не могут обеспечить предоставление определенного вида услуг связи, в то время как пользователь - владелец одного типа терминала хочет иметь максимально возможный спектр предоставляемых услуг;

- возрастают требования к оперативности информационного обмена, в то время как имеющиеся емкости (пропускные способности) каналов связи или производительность телекоммуникационных систем ограничены и/или не могут быть увеличены (по техническим или экономическим причинам) в течение нескольких лет;

- владельцы систем связи (операторы любого уровня) стремятся повысить эффективность использования ресурсов своих сетей при обеспечении заданного качества предоставляемых услуг связи и др [16].

Одним из решений в сложившейся ситуации является интеграция (объединение на различных уровнях) систем связи.

## **1.6 Теоретическое обоснование объединения наземных и спутниковых систем связи**

В качестве теоретической предпосылки такого объединения является известный факт теории массового обслуживания, которая традиционно используется для расчета вероятностно-временных характеристик систем и сетей связи: использование объединенного ресурса (пропускная способность, производительность и т.д.) с общей очередью запросов на предоставление услуг связи предпочтительнее по практически всем основным показателям, чем независимое раздельное использование нескольких систем связи той же пропускной способности [17].

Интеграция систем связи, как бы это ни казалось привлекательным с первого взгляда, задача не тривиальная. Более того, при неправильном объединении различных систем могут быть достигнуты абсолютно

противоположные результаты, т.е. вместо улучшения основных показателей сетей связи в результате будут получены худшие характеристики.

В будущих наземных сетях связи в рамках построения Национальной Информационной Структуры США - НИС одной из основных проблем является проблема «последней мили». В частности, эта программа предусматривает увеличение скорости доступа конечного пользователя к информационным ресурсам на три порядка (около 100 Мбит/с). В принципе данную скорость доступа могут обеспечить различные транспортные средства: коаксиальный кабель, ВОЛС и спутниковые каналы связи. Однако такие скорости в действительности не нужны. В настоящее время и в ближайшем будущем основным типом трафика в сетях связи является речь. Как мы уже ранее отмечали, с использованием цифровых методов передачи речи (устранение смысловой избыточности, эффективное кодирование и др.) можно, практически без ухудшения качества передачи речи, использовать каналы связи 4,8 - 16 кбит/с. В настоящее время сети телефонной связи ориентированы на использование каналов связи 64 кбит/с, т.е. существенно выше требуемой скорости передачи речи. Таким образом, уже в настоящее время для передачи речи нет необходимости повышать скорость передачи информации на участке «последней мили».

В наземных сетях связи, наряду с использованием помехоустойчивого кодирования, одним из используемых методов повышения достоверности передачи информации является применение каналов с обратной связью ARQ (Automatic Repeat Request). В этом случае приемный узел отправляет передающему узлу подтверждающие сообщения, в которых указывается степень правильности приема принятой информации. При наличии в принятом сообщении ошибок, появившихся в сообщении при передаче по каналу связи, передающей стороне отправляется запрос на повторную передачу ошибочного пакета. Это достаточно эффективный механизм для наземных сетей связи, однако использование его в ССС при широковещательной передаче сообщений может значительно снизить пропускную способность спутниковых каналов связи из-за того, что повторная передача искаженного пакета, принятого одной из ЗС, передается через спутник-ретранслятор в широковещательном режиме, т.е. передается всем наземным станциям даже в том случае, если все остальные станции приняли его правильно после первой передачи данного пакета. Таким образом, пропускная способность канала связи спутника-ретранслятора будет определяться параметрами наихудшей ЗС, с точки зрения помехоустойчивости приема, тем самым ограничивая возможности приема остальных ЗС. Очевидно, что если каким-то образом реализовать повторную передачу искаженного пакета только для той станции, которой он предназначен, то это приведет к повышению производительности спутниковой сети связи. Одним из таких решений является использование для этой цели наземных линий связи, если такие линии можно организовать. В этом случае повторная передача искаженных пакетов осуществляется по наземным линиям связи между центральной

станцией и ЗС, которая неправильно приняла данный пакет при его первой передаче. Таким образом, объединение ССС и наземной сети связи приводит к повышению пропускной способности ССС. Более того, при такой организации информационного обмена и стоимость ЗС может быть снижена за счет некоторого ухудшения характеристик, обеспечиваемых космической линией связи.

Результаты оценочного расчета показали, что производительность ССС снижается с ростом числа ЗС, в то время как в интегрированной сети такая зависимость отсутствует [18]. Очевидно, что повышение производительности интегрированной сети связи требует наличия наземных каналов связи между ЦС и ЗС, т.е. требует увеличения общей пропускной способности каналов связи (фактически, это и есть плата за достижение более высоких характеристик сети). Получение количественных оценок при интеграции ССС с наземными сетями связи с целью повышения производительности ССС является самостоятельной задачей, решение которой зависит от конкретных реальных условий функционирования обеих сетей связи. Необходимо отметить, что область эффективного применения интегрированной сети связи можно расширить путем, например, повторной ретрансляции пакетов к требуемой ЗС не из ЦС, а от ближайшей к данной ЗС земной станции. В этом случае, при прочих равных условиях, снижается вероятность ошибочной передачи по наземным каналам связи, а также снижается загрузка оборудования ЦС. В частности, данный алгоритм реализован в протоколе RMTP (Reliable Multicast Transport Protocol). Другим путем повышения производительности интегрированной сети является применение в каналах связи методов омехоустойчивого кодирования, например, использование кодов БЧХ.

Необходимость увеличения пропускной способности и эффективности ССС явилась одной из причин освоения высокочастотного диапазона частот 10/20 ГГц и выше, в котором полоса частот намного превышает суммарную полосу частот, используемую на более длинных волнах. Потенциальные возможности систем в этом диапазоне частот оцениваются в 10 тыс. каналов связи со скоростью передачи информации в каждом канале не менее 2 Мбит/с.

Как видно из рисунка 3, ослабление радиоизлучения в атмосфере имеет общую тенденцию возрастать с ростом частоты и зависеть от погодных условий. Для надежной связи в Кл-диапазоне в некоторых случаях необходимо иметь энергетический запас не менее 10 дБ вместо (4-6) дБ, на который ориентируются проектировщики в настоящее время. Более того, для iCa-диапазона даже запас в 20 дБ не всегда может обеспечить надежную связь. Наиболее простым решением этой проблемы, особенно для территорий с неблагоприятными погодными условиями, является обеспечение значительного энергетического запаса в радиолинии «вниз», однако это чаще всего невозможно. Одним из распространенных методов, повышающих надежность связи при замираниях сигнала, обусловленных погодными

условиями на трассе распространения или при многолучевом распространении из-за интерференции сигналов (когда в приемную антенну один и тот же сигнал поступает по нескольким геометрически различным трассам) является метод разнесенного приема, хорошо известный в системах связи на более длинных волнах. Идея этого метода состоит в том, что в схему канала связи вводится некоторая избыточность:

- пространственная, когда прием сигнала ведется на одну из нескольких (или на все одновременно) территориально разнесенных антенн, причем для снижения эффекта многолучевого распространения достаточно разнести их на расстояние не менее  $(10—20) \lambda$ , (где,  $\lambda$  - длина волны), а для уменьшения эффектов снижения мощности из-за поглощения в дожде - на расстояние нескольких километров. На практике обычно используют от 2 до 6 приемных станций;

- частотная, когда один и тот же сигнал передается и принимается на разных частотах. Выигрыш достигается только в том случае, если интервал между несущими частотами больше ширины полосы когерентности сигнала;

- поляризационная, когда сигналы передаются с различной поляризацией, а прием ведется с использованием двух различных приемников для горизонтально и вертикально поляризованных копий сигнала;

- использование комбинации вышеприведенных методов введения избыточности и др.

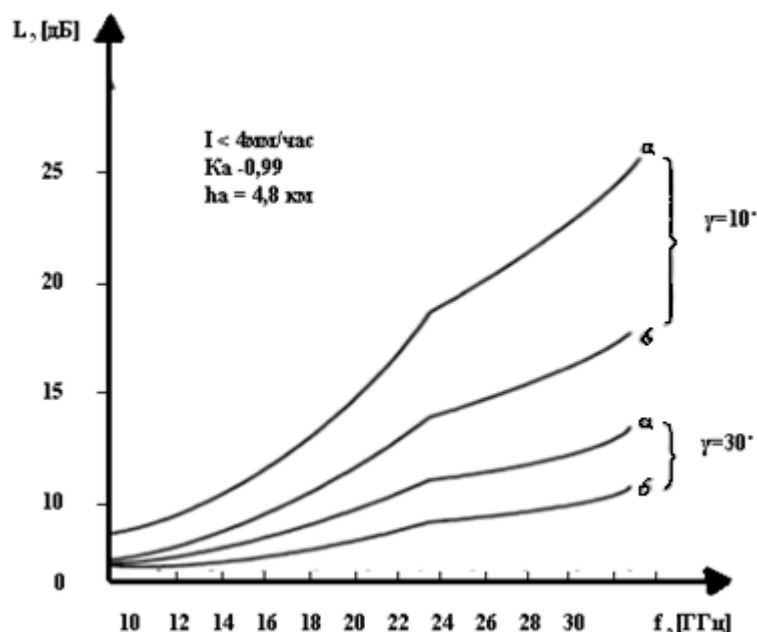


Рисунок 3 – Затухание радиоволн в атмосфере Земли с учетом дождя в диапазоне 10-30 ГГц [19]

Наиболее просто реализуется пространственный метод разнесенного приема с реализацией схемы автовыбора, отдельные варианты которого



показаны на рисунке 4. В этом случае в качестве основной приемной антенны мегаполиса или небольшого города выбирается та, уровень приемного сигнала которой в данный момент времени максимален.

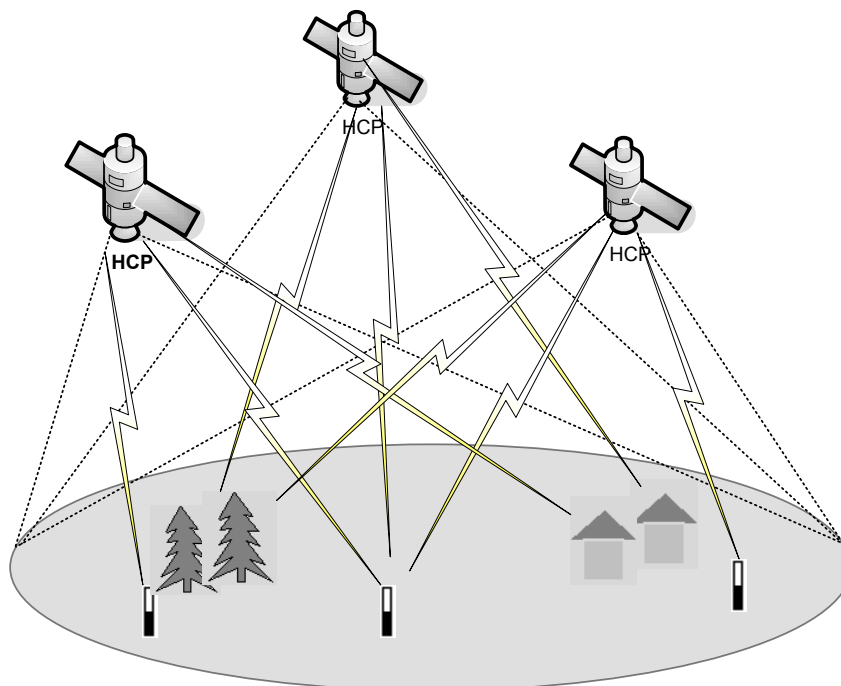


Рисунок 4 – Пример пространственного разнесенного приема [20]

Пространственное разнесение маршрутов эффективно и в сетях персональной подвижной спутниковой связи для снижения вероятности затенения низкоорбитального ретранслятора предметами окружающей обстановки.

Чтобы обеспечить связью подвижных пользователей, системы связи, предназначенные для обеспечения их информационного взаимодействия, должны охватывать всю возможную территорию (или область пространства), в которой могут находиться эти объекты. В идеальном случае система связи должна обеспечить глобальный охват земной поверхности. А при обеспечении связи с воздушными или космическими объектами система должна охватывать околоземное воздушное или космическое пространство. Очевидно, что создание таких больших систем является трудоемкой и дорогостоящей задачей. Более того, в этом случае возникают и преграды, связанные с вопросами межгосударственного взаимодействия. В некоторых случаях, например при обеспечении роуминга в сотовых сетях связи, между национальными операторами заключаются межоператорские соглашения и организуются каналы связи между этими национальными сетями.

Однако и в этом случае сотовые системы связи в настоящее время не могут охватить всю земную территорию. Более того, в реальных системах имеется существенная неравномерность загрузки каналов связи между различными сотами, а также часто возникает их перегрузка. Это приводит, в

частности, к разрыву даже уже установленных соединений, например при переходе одного абонента из одной соты с низкой загрузкой каналов связи в другую соту, в которой все доступные каналы связи уже заняты.

В других же случаях, например при обеспечении функционирования космических аппаратов (КА), а также для передачи разнородной информации с КА в центры сбора и обработки информации, применяются системы связи, в состав которых входят совокупность (сеть) наземных пунктов (узлов) приема-передачи информации (НППИ). Именно так строились первые сети для организации информационного обмена между Центром управления полетами и КА. Расположение наземных пунктов выбиралось таким образом, чтобы обеспечить максимально возможную оперативность доставки информации с КА. Однако, наряду с интеллектуализацией КА, требования к увеличению оперативности доставки информации с КА постоянно растут, возникает необходимость обеспечения информационного взаимодействия центров управления с КА в реальном масштабе времени.

Одним из решений задачи обслуживания подвижных пользователей с заданным качеством является объединение наземных и спутниковых систем или сетей связи. Наряду с количественным увеличением частотного и временного ресурсов (увеличение зоны или времени радиовидимости объектов), в таких системах эти ресурсы наиболее эффективно используются за счет появляющейся возможности применения динамического управления информационными потоками. В частности, при сильной загруженности сотовой системы связи возможно перенаправить информационные потоки между сотами через спутниковую сеть, обойдя эти загруженные участки сети. При построении сети связи, например с космическими аппаратами, использование спутников-ретрансляторов обеспечивает практически глобальную зону охвата околоземного космического пространства.

В свою очередь, при перегрузке спутниковых каналов связи для организации информационного обмена также возможно использовать совокупность НППИ, зоны радиовидимости которых пересекают космические аппараты.

## 2 Теоретический расчет

### 2.1 Энергетический бюджет спутниковых линий связи

При разработке ССС важной задачей является выбор рациональных способов модуляции и кодирования передаваемых цифровых сигналов. При этом следует стремиться к компромиссу между количеством связных ресурсов канала, расходуемых на передачу цифровой информации с заданной скоростью, и качеством и сложностью используемых алгоритмов обработки, а также вносимой ими задержкой [21].

Известно, что при фиксированных скоростях и качестве передачи информации в радиоканале связи существуют обменные соотношения между частотным и энергетическим ресурсами канала связи. На практике возникает задача выбора структуры передаваемых сигналов и способов их обработки таким образом, чтобы наилучшим образом адаптироваться к стандартизованным параметрам стволов БРТК ретранслятора для решения конкретных прикладных задач.

При этом возникает необходимость рассмотрения различных сочетаний методов модуляции и кодирования.

Матричные коды, при декодировании которых используется итерационная процедура, получили название матричных турбокодов. Высокая помехоустойчивость МТК объясняется практической реализуемостью итерационного декодирования кодов со значительной блоковой длиной. Однако задержка обработки при этом максимальна среди всех перечисленных выше способов модуляции-кодирования. Наилучшее использование полосы частот при сохранении приемлемо высокой помехоустойчивости обеспечивает восьмифазная ФМ в сочетании с решетчатым кодированием - РК (TCM - Trellis Coded Modulation). Достоинством РК является также то, что оно в наименьшей степени подвержено негативному влиянию нелинейных явлений в спутниковом радиоканале. Однако РК является само по себе нелинейной схемой, и его практическое применение ограничивается чрезмерной сложностью оптимального приемника. Использование же более простых линейных приемников приводит к потере эффективности.

Шестнадцати уровневая квадратурная амплитудная манипуляция наиболее эффективна с точки зрения полосы частот, но имеет наихудшие показатели помехоустойчивости и предъявляет наиболее жесткие требования к линейности тракта передачи. Поэтому использование КАМ-16 ограничивается лишь ретрансляторами с избыточным энергетическим потенциалом. Кроме того, увеличение кратности модуляции приводит к увеличению времени вхождения в связь (в синхронизм), что чаще всего неприемлемо.

В силу указанных причин наибольшее практическое использование в спутниковых радиоканалах нашла квадратурная фазовая манипуляция.

Рассмотрим энергетический бюджет спутниковых каналов связи на примере глобальной спутниковой сети связи.

Глобальная ССС фиксированной службы диапазона 6/4 ГГц. Основным назначением подобных ССС является организация магистральных каналов связи, а также первичное распределение и обмен телевизионных программ. Под каждый магистральный канал выделяется один из стволов ретранслятора. Земные станции магистральной спутниковой связи обычно выполняют многоканальными, способными организовать несколько магистральных каналов через несколько стволов одного ретранслятора. ЗС оборудуются следящими приемопередающими антеннами диаметром (9-15) метров. Выходная мощность передатчиков составляет (0,75-3) кВт на каждый ствол.

Типовое значение ЭИИМ земной станции в глобальных сетях равно (26-30) дБВт. Стволы ретрансляторов С-диапазона в подобных сетях обычно имеют полосу пропускания 36 МГц и усилители с выходной мощностью (20-30) Вт.

### 2.1.1 Расчет энергетического бюджета ЗС – ГСР

Исходные данные для расчета приведены в таблицах 1-2.

Т а б л и ц а 1– Исходные данные для расчета энергетического бюджета

Параметр	Значение
Мощность полезного сигнала на входе приёмника $P_c$ , дБ	-105
Угол обзора области обслуживания $\beta$ , град	16
Частотный диапазон, ГГц	6 (с)
Диаметр передающей антенны ЗС $D$ , м	11
Коэффициент усиления передающей антенны, дБ	55,2
Выходная мощность передатчика ЗС $P_{пер}$ , Вт	500
Потери сигнала на передающей стороне, дБ	1
Полоса частот $\Delta f$ , МГц	36
Эквивалентная изотропно излучаемая мощность ЭИИМ ЗС, дБВт	45,5
Потери сигнала в приёмном тракте ретранслятора, дБ	1
Потери сигнала в невозмущенной атмосфере, дБ	0,2

Окончание таблицы 1

Параметр	Значение
Потери наведения антенны, дБ	3,3
Способ модуляции – кодирования	без кодирования
Пороговое отношение сигнал/шум $h_{2n}$ , дБ	27
Полная шумовая температура приёмной системы ретранслятора, К о	1500
Шумовая температура бортовой и земной антенн $K_u$ , К о	0,7

Рассчитаем энергетические соотношения в каналах связи глобальной СС фиксированной службы диапазона 6/4 ГГц

Определяем коэффициент усиления антенны земной станции на передачу и бортового ретранслятора на приём.

Коэффициент усиления антенны ЗС при работе на передачу

$$G_3 = 109,67 \cdot K_u \cdot D^2 \cdot f^2, \quad (2.1.1.1)$$

где  $K_u$  - шумовая температура бортовой и земной антенн;

$D$  - диаметр антенны, м;

$f$  - полоса частот, МГц.

$$G_3 = 109,67 \cdot 0,7 \cdot 121 \cdot 36 = 334406 \text{ (55,2 дБ)}.$$

Ширина диаграммы направленности антенны ЗС

$$\theta = \frac{18}{D \cdot f}, \quad (2.1.1.2)$$

где  $D$  - диаметр антенны, м;

$f$  – полоса частот, МГц.

$$\theta = \frac{18}{11 \cdot 6} \text{ рад (15,5}^\circ\text{)}$$

Коэффициент усиления приёмной антенны бортового ретранслятора

$$G_6 = \frac{35530 \cdot K_u}{\theta^2}, \quad (2.1.1.3)$$

где  $K_u$  - шумовая температура бортовой и земной антенн, К°;  
 $\Theta$  - ширина направленности антенны, рад.

$$G_6 = \frac{35530 \cdot 0,7}{15,5^2} = 103,5 \text{ (20 дБ)}$$

Потери на участке «вверх» ЗС-КС  
 Потери в свободном пространстве

$$L_o = 1,75 \cdot 10^{15} \cdot d^2 \cdot f^2, \quad (2.1.1.4)$$

где  $d$  – наклонная дальность между ЗС и КС тыс. км;  
 $f$  – частота на передачу, ГГц.

$$L_o = 1,75 \cdot 10^{15} \cdot 41^2 \cdot 6^2 = 1,06 \cdot 10^{20} \text{ (200 дБ)}$$

Дополнительные потери

$$L_{\text{доп}} = 3,3 + 0,2 + 1 = 4,5 \text{ дБ.}$$

Определяем отношение сигнал-шум на входе приёмника ретранслятора  
 Мощность полезного сигнала на входе приёмника

$$P_c = P_{\text{перЗС}} + G_3 + G_6 - L_o - L_{\text{доп}}, \quad (2.1.1.5)$$

где  $P_{\text{перЗС}}$  - мощность передатчика земной станции, Вт;  
 $G_3$  - коэффициент усиления земной станции;  
 $G_6$  - коэффициент усиления бортового ретранслятора;  
 $L_o$  - потери в свободном пространстве, дБ;  
 $L_{\text{доп}}$  - дополнительные потери, дБ.

$$P_c = 26,99 + 55,2 + 20 - 200 - 4,5 = -102,3 \text{ дБ}$$

Мощность шума в полосе частот ствола ретранслятора

$$P_{\text{ш}} = kT\Delta f, \quad (2.1.1.6)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана, Дж/К.  
 $T$  - шумовая температура приемной системы ретранслятора, К°;  
 $\Delta f$  - полоса частот, ГГц.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500 \cdot 36 \cdot 10^6 = 7,45 \cdot 10^{-13} \text{ Вт (-119 дБВт)}$$

Отношение сигнал-шум на входе приёмника ретранслятора

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = -102,3 - (-119) = 16,7 \text{ дБ} \quad (2.1.1.7)$$

Рассчитаем отношение сигнал-шум на входе приёмника ретранслятора при работе в дожде.

Определяем потери в дожде.

Широта ЗС  $43^\circ$  с.ш,  $77^\circ$  в.д высота над уровнем моря  $h_{ЗС}=681$  м [22].  
Климатическая зона Е, где интенсивность дождя  $I=22$  мм/час. Допустимый коэффициент доступности канала связи  $K_d=0,99$ .

Угол возвышения антенны ЗС

$$\gamma = \arcsin \frac{H \cos \psi_H \cos(\lambda_c - \lambda_H)}{\sqrt{H^2 + R^2 + 2HR \cos \psi_H \cos(\lambda_c - \lambda_H)}}, \quad (2.1.1.8)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{42170 \cdot 10^3 \cos 43 \cos(60 - 77)}{\sqrt{(42170 \cdot 10^3)^2 + (6371 \cdot 10^3)^2 + 2 \cdot 42170 \cdot 10^3 \cdot 6371 \cdot 10^3 \cos 43 \cos(60 - 77)}} = 27^\circ$$

где  $H=42170$  км – высота орбиты геостационарного спутника над Землёй;

$R=6371$  км – радиус Земли;

$\varphi_H$  - широта ЗС,  $^\circ$ ;

$\lambda_c - \lambda_H$  - разность по долготе между спутником и ЗС;

$\lambda_c = 60^\circ$  в.д;

$\lambda_H = 77^\circ$  в.д.

Высота нулевой изотермы

$$h_{Д} = \begin{cases} 4,8, & \text{при } \Psi_c < 10^\circ \\ 7,8 - 0,1(\Psi_c), & \text{при } \Psi_c > 10^\circ, \end{cases} \quad (2.1.1.9)$$

$$h_{Д} = 7,8 - 0,1 \cdot 50 = 2,8 \text{ км}$$

Эффективная высота дождевого слоя

$$h_{Д} = \begin{cases} 4,8, & \text{при } \Psi_c < 10^\circ \\ 7,8 - 0,1(\Psi_c), & \text{при } \Psi_c > 10^\circ \end{cases} \quad (2.1.1.10)$$

$$h_{Д} = h_{и} + 10 \lg (22/10) = 6.2 \text{ км, т.к. } I = 22 \text{ мм/час} > 10 \text{ мм/час}$$

Длина пути сигнала в дождевом слое с учетом  $h_{ЗС}=681$  км

$$l = \frac{h_d}{\sin \gamma}, \quad (2.1.1.11)$$

где  $h_d$  - эффективная высота дождевого слоя, мм/час;  
 $\gamma$  - угол возвышения ЗС, в градусах.

$$l = \frac{2,8}{\sin 27^\circ} = 6,23 \text{ км}$$

Потери в дожде

$$L_d = a \cdot l^b \cdot 1 \text{ дБ} \quad (2.1.1.12)$$

где  $a$  и  $b$  - коэффициенты, зависящие от частоты

$$a = 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2,49}, \text{ при } f, 9 \leq f \leq 54 \text{ ГГц}$$

$$b = \begin{cases} 1,41 \cdot f^{-0,0779}, & \text{при } 2,54 < f < 25 \text{ ГГц} \\ 2,63 \cdot f^{-0,0272}, & \text{при } 25 < f < 164 \text{ ГГц} \end{cases} \quad (2.1.1.13)$$

$$a = 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot 6^{2,49} = 0,036$$

$$b = 1,41 \cdot 6^{-0,0779} = 1,2$$

$$L_d = 0,036 \cdot 22^{1,2} \cdot 6,23 = 0,9 \text{ дБ}$$

Отношение сигнал-шум на входе приёмника ретранслятора при работе в дожде, дБ

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_d = \frac{P_c}{P_{ш}} - L_d \quad (2.1.1.14)$$

где  $P_c$  - мощность сигнала, Вт;  
 $P_{ш}$  - мощность шума, Вт;  
 $L_d$  - потери в дожде, дБ.

$$\left( \frac{P_c}{P_{ш}} \right)_d = 16,7 - 0,9 = 14,8 \text{ дБ}$$

Рассчитаем добротность и пропускную способность канала связи ЗС-КС  
 Добротность приёмной системы ретранслятора



$$\frac{G}{T_p} = \frac{103,5}{1600} = 0,109 \text{ (-11 дБ)}$$

Энергетический потенциал

$$\text{ЭП} = \frac{P_c}{N_o}, \quad (2.1.1.15)$$

где  $N_o$  - эквивалентная спектральная плотность мощности шума, приведенная по входу приёмника;

$P_c$  - мощность сигнала, Вт.

$$N_o = k \cdot T_p,$$

где  $k$  - постоянная Больцмана, Дж/К;

$T_p$  - шумовая температура ретранслятора, К.

$$N_o = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1600 = -196,86 \text{ дБ},$$

$$\text{ЭП} = -102,3 - (-196,86) = 94,57 \text{ дБ}$$

Определим пропускную способность магистрального канала этой ССС. Допустим, что требуется обеспечить вероятность ошибочного приема двоичного символа не более  $10^{-7}$ . В рассматриваемом случае одновременно ограничены энергетические и частотные ресурсы ствола ретранслятора - выходная мощность 20 Вт и полоса пропускания 36 МГц. Это требует совместного выполнения двух неравенств

$$\begin{cases} C \leq C_1 = \frac{P_c}{N_o h_n^2} \\ C \leq C_1 = \frac{\Delta f}{B} \end{cases}, \quad (2.1.1.16)$$

где  $P_c$  - мощность сигнала, Вт;

$N_o$  - эквивалентная спектральная плотность мощности шума, приведенная по входу приёмника;

$B$  - база сигнала;

$\Delta f$  - полоса частот, МГц.

$$C = \Delta f_{\text{ст}} \log_2(1 + P_c/P_{\text{ш}}) \quad (2.1.1.17)$$

$$C = 36000 \log_2(1 + 16,7) = 5,6 \cdot 10^6 \text{ Бит/сек}$$

Типовые параметры спутникового канала без кодирования  $B = 2$ ;  $h_n^2 = 27$  дБ

$$C_1 = 94,57 - 27 = 67,57 \text{ дБ } (5,71 \cdot 10^6 \text{ Бит/сек})$$

$$C_2 = 36 \cdot 10^6 / 2 = 18 \cdot 10^6 \text{ Бит/сек } (72,55 \text{ дБ})$$

$C = C_1 = 67,57$  дБ ( $5,71 \cdot 10^6$  Бит/сек) — определяется энергетическими возможностями ретранслятора, а полоса пропускания используется лишь частично.

Коэффициент использования полосы частот

$$k_{\text{исп}} = \frac{BC}{f}, \quad (2.1.1.18)$$

где  $B$  - база сигнала;  
 $f$  - полоса частот, МГц.

$$k_{\text{исп}} = \frac{2 \cdot 5,71 \cdot 10^6}{36 \cdot 10^6} = 0,46$$

В случае, если  $C=C_2$  пропускная способность канала ограничивается частотным ресурсом ствола, а избыток энергетики приводит к превышению порогового отношения-шум в  $BC/\Delta f_{\text{см}}$  раз.

### 2.1.2 Расчет энергетического бюджета каналов связи ГСР-3С

Т а б л и ц а 2 – Параметры расчеты энергетического бюджета ГСР-3С

Параметр	Значение
Частотный диапазон, ГГц	4 (с)
Коэффициент усиления передающей антенны ретранслятора, дБ	16
Выходная мощность ствола ретранслятора, Вт	20
Потери сигнала на передающей стороне, дБ	1
ЭИИМ ствола ретранслятора, дБ	28
Потери сигнала в приёмном тракте ЗС, дБ	2,5
Потери сигнала в приёмном тракте ЗС, дБ	2,5

Окончание таблицы 2

Диаметр приёмной антенны ЗС, м	11
Полоса частот ствола, МГц	36
Шумовая температура ЗС,о К	1500
Пороговое отношение сигнал-шум h 2п, дБ	27

Определяем коэффициент усиления антенны земной станции на приём и бортового ретранслятора на передачу

Коэффициент усиления антенны ЗС при работе на приём

$$G_{3C} = 109,67 \cdot K_u \cdot D^2 \cdot f^2 \quad (2.1.2.1)$$

где D - диаметр антенны, м;  
f - полоса частот, МГц.

$$G_{3c} = 109,67 \cdot 0,7 \cdot 121 \cdot 16 = 148624,784 \text{ (51,72 дБ)}$$

Ширина диаграммы направленности антенны ЗС

$$\theta = \frac{18}{D \cdot f}, \quad (2.1.2.2)$$

$$\theta = \frac{18}{11 \cdot 4} = 0,4 \text{ рад (23}^\circ\text{)}$$

Коэффициент усиления антенны бортового ретранслятора

$$G_{3c} = \frac{35530 \cdot K_u}{\theta^2}, \quad (2.1.2.3)$$

где  $\Theta$  - ширина направленности антенны, рад.

$$G_{3c} = \frac{35530 \cdot 0,7}{23^2} = 16,72 \text{ дБ}$$

Рассчитаем потери на участке «вниз» КС-ЗС

Потери в свободном пространстве

$$L_o = 1,75 \cdot 10^{15} \cdot d^2 \cdot f^2, \quad (2.1.2.4)$$

где  $d$  - наклонная дальность между ЗС и КС тыс. км;  
 $f$  - частота на передачу, ГГц.

$$L_o = 1,75 \cdot 10^{15} \cdot 41^2 \cdot 4^2 = 0,47 \cdot 10^{20} = 196,8 \text{ дБ}$$

Дополнительные потери

$$L_{\text{доп}} = L_H + L_a + L_{\text{пр}}, \quad (2.1.2.5)$$

где  $L_H$  - потери наведения, дБ;  
 $L_a$  - потери на приеме антенны, дБ;  
 $L_{\text{пр}}$  - прочие потери, дБ.

$$L_{\text{доп}} = 2,5 + 0,15 + 1 = 3,65 \text{ дБ}$$

Определим отношение сигнал-шум на входе приёмника ЗС  
 Мощность полезного сигнала на входе приёмника ЗС

$$P_c = P_{\text{пер} \text{ЗС}} + G_{\text{ЗС}} + G_{\text{Б}} - L_o - L_{\text{доп}}, \quad (2.1.2.6)$$

где  $P_{\text{пер} \text{ЗС}}$  - мощность передатчика земной станции, Вт;  
 $G_{\text{ЗС}}$  - коэффициент усиления земной станции, дБ;  
 $G_{\text{Б}}$  - коэффициент усиления бортового ретранслятора, дБ;  
 $L_o$  - потери в свободном пространстве, дБ;  
 $L_{\text{доп}}$  - дополнительные потери, дБ.

$$P_c = 13 + 51,72 + 16 - 196,8 - 3,65 = -119,73 \text{ дБВт}$$

Мощность шума в полосе частот ствола ЗС

$$P_{\text{ш}} = kT\Delta f, \quad (2.1.2.7)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана, Дж/К.  
 $T$  - шумовая температура приемной системы ретранслятора, К°;  
 $\Delta f$  - полоса частот, ГГц.

$$P_{\text{ш}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500 \cdot 36 \cdot 10^6 = 7,45 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} = -118 \text{ дБВт}$$

Отношение сигнал-шум на входе приёмника

$$\frac{P_c}{P_{ш}} = 119,73 - (-135,63) = 15,9 \text{ дБ}$$

Рассчитаем отношение сигнал-шум на входе приёмника ЗС при работе в дожде.

Определяем потери в дожде

$$L_d = a \cdot I^b \cdot l, \quad (2.1.2.8)$$

где  $I = 22$  мм/час - интенсивность выпадения осадков в зоне Е;

$l$  - длина пути сигнала в дождевом слое;

$a$  и  $b$  - вспомогательные коэффициенты.

Широта ЗС  $51^\circ$  с.ш,  $71^\circ$  в.д высота над уровнем моря  $h_{ЗС}=350$  м  
Климатическая зона Е, где интенсивность дождя  $I = 22$  мм/час. Допустимый коэффициент доступности канала связи  $K_d = 0,99$ .

Угол возвышения антенны ЗС

$$\gamma = \arcsin \frac{H \cos \varphi_H \cos(\lambda_c - \lambda_H)}{\sqrt{H^2 + R^2 + 2HR \cos \varphi_H \cos(\lambda_c - \lambda_H)}}, \quad (2.1.1.8)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{42170 \cdot 10^3 \cos 43 \cos(60 - 71)}{\sqrt{(42170 \cdot 10^3)^2 + (6371 \cdot 10^3)^2 + 2 \cdot 42170 \cdot 10^3 \cdot 6371 \cdot 10^3 \cos 51 \cos(60 - 71)}} = 30^\circ$$

где  $H = 42170$  км – высота орбиты геостационарного спутника над Землёй;

$R = 6371$  км – радиус Земли;

$\varphi_H$  - широта ЗС,  $^\circ$ ;

$\lambda_c - \lambda_H$  - разность по долготе между спутником и ЗС;

$\lambda_c = 51^\circ$  с.ш;

$\lambda_H = 71^\circ$  в.д.

$$a = 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot f^{2,49}, \text{ при } 2,9 \leq f \leq 54 \text{ ГГц}$$

$$a = 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot 4^{2,49} = 0,00132$$

$$b = \begin{cases} 1,41 \cdot f^{-0,0779}, & \text{при } 2,54 < f < 25 \text{ ГГц} \\ 2,63 \cdot f^{-0,0272}, & \text{при } 25 < f < 164 \text{ ГГц} \end{cases} \quad (2.1.2.9)$$

$$b = 1,41 \cdot f^{-0,0779} = 1,26$$

$$l = \frac{h_d - h_{ЗС}}{\sin \gamma}, \quad (2.1.2.10)$$

где  $h_d$  – эффективная высота дождевого слоя;  
 $h_{3c} = 51^\circ$  – широта ЗС.

$$h = \begin{cases} h_i, & \text{при } I < 10 \text{ мм/час} \\ h_i + 10 \lg\left(\frac{I}{10}\right), & \text{при } I > 10 \text{ мм/час} \end{cases} \quad (2.1.2.11)$$

Высота нулевой изотермы

$$h_d = \begin{cases} 4,8, & \text{при } \Psi_c < 10^\circ \\ 7,8 - 0,1(\Psi_c), & \text{при } \Psi_c > 10^\circ, \end{cases} \quad (2.1.1.9)$$

где  $\Psi_c$  - широта ЗС, в градусах.

$$h_i = 7,8 - 0,1(36) = 4,2,$$

$$h_d = 4,2 + 10 \lg(22/10) = 7,62,$$

$$l = \frac{7,62}{\sin 30^\circ} = 12,96 \text{ км}, \quad (2.1.2.10)$$

$$L_d = 0,00132 \cdot 22^{1,26} \cdot 12,96 = 0,84 \text{ дБ}$$

2.1.3 Отношение сигнал-шум на входе ЗС при работе в дожде

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_d = \frac{P_c}{P_{ш}} - L_d, \quad (2.1.2.11)$$

где  $P_c$  - мощность сигнала, Вт;

$P_{ш}$  - мощность шума, Вт;

$L_d$  - потери в дожде, дБ.

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_d = 11,27 - 0,84 = 10,43 \text{ дБ}$$

Рассчитаем добротность и пропускную способность канала связи КС-ЗС

Добротность приёмной системы ретранслятора

$$\frac{G}{T_p} = \frac{47}{1500} = 0,03 (-15 \text{ дБ}),$$

где  $T_p$  - шумовая температура приёмного тракта ЗС, К°;

$G$  - коэффициент усиления антенны, дБ.

Энергетический потенциал

$$\text{ЭП} = \frac{P_c}{N_o}, \quad (2.1.2.12)$$

где  $N_o$  - эквивалентная спектральная плотность мощности шума, приведенная по входу приёмника, дБ.

$P_c$  - мощность сигнала, Вт.

$$N_o = k \cdot T_p, \quad (2.1.2.13)$$

где  $k$  - постоянная Больцмана, Дж/К;

$T_p$  - шумовая температура ретранслятора, К°

$$N_o = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 1500 = 2,07 \cdot 10^{-21} \text{ (-206,8 дБ)},$$

$$\text{ЭП} = -119,73 - (-206,8) = 87 \text{ дБ}$$

Пропускная способность канала

$$\begin{cases} C \leq C_1 = \frac{P_c}{N_o h_n^2} \\ C \leq C_1 = \frac{\Delta f}{B} \end{cases}, \quad (2.1.1.14)$$

где  $B$  - база сигнала;

$\Delta f$  - полоса частот, МГц.

$$C = \Delta f_{\text{ст}} \log_2(1 + P_c/P_{\text{ш}}), \quad (2.1.1.15)$$

$$C = 36000 \log_2(1 + 15,9) = 5,6 \cdot 10^6 \text{ Бит/сек}$$

Типовые параметры спутникового канала без кодирования  $B = 2$ ;  $h_n^2 = 27$  дБ

$$C_1 = 87 - 27 = 60 \text{ дБ}$$

Коэффициент использования полосы частот

$$k_{\text{исп}} = \frac{BC}{f}, \quad (2.1.2.17)$$

где  $B$  - база сигнала;

$$k_{исп} = \frac{2 \cdot 10^6}{36 \cdot 10^6} = 0,055$$

Таким образом, из расчетов можно сделать вывод, что рассчитанная спутниковая система соответствует параметрам спутника Intelsat 904. Все полученные параметры удовлетворяют необходимым, такие как пороговая мощность полезного сигнала на входе приёмника, отношение сигнал/шум, потери в дожде и пространстве и т.д.

## 2.2 Расчет характеристик оптического волокна

На данном участке ВОЛС применяется 12-волоконный кабель фирмы SIECOR с одномодовыми волокнами и ступенчатой дисперсией марки

A-DF(ZN)2Y3X4E9/125 0.38F3,5+0.22H18. Скоростью передачи информации 2488,320 Мбит/с, работает на длине волны  $\lambda = 1550$  нм. Основные оптические характеристики приведены в таблице 3.1

Т а б л и ц а 3 - Оптические характеристики кабеля типа A-DF(ZN) 2Y 3x4 E9/125 0,38F3,5+0,22H,18

Параметр кабеля	Значение
Диаметр пятна модового поля (1550 нм)	10,5 мкм+/-1,5 мкм
Диаметр волокна с покрытием	125 мкм+/-2 мкм
Погрешность концентричности пятна модового поля	$\leq 1$ мкм
Некруглость покрытия	$\leq 2$ %
Профиль коэффициента преломления	N <sub>1</sub> шаговой
Показатель преломления сердцевины для 1550 нм	1,4681
Числовая апертура	0,13
Критическая длина волны	$\leq 1250$ нм

### 2.2.1 Расчет апертуры

Важнейшим обобщённым параметром волоконного световода является апертура.

Апертура – это угол между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения.

Рассчитаем показатель преломления оболочки  $n_2$ , исходя из оптических характеристик кабеля числовая апертура NA = 0,13.

Известно, что



$$NA = \sqrt{n_1^2 + n_2^2}$$

где  $n_1$  – показатель преломления сердцевинки, 1,4681;  
 $n_2$  - показатель преломления оболочки,  $n_2 = 1,4623$ .  
Тогда определим  $n_2$

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 + NA^2}, \quad (2.2.1.1)$$

$$n_2 = \sqrt{1,4681^2 + 0,13^2} = \sqrt{2,1553 + 0,0169} = 1,4623$$

Важнейшим обобщённым параметром волоконного световода, используемым для оценки его свойств, является нормированная частота  $V$ . Она получается суммированием аргументов цилиндрических функций для сердцевинки ( $g_1 a$ ) и оболочки ( $g_2 a$ ) формула (3.10)

$$\begin{aligned} V &= ((g_1 a)^2 - (g_2 a)^2)^{1/2} = ((k_1^2 - b^2) + (b^2 - k_2^2))^{1/2} = (k_1^2 - k_2^2)^{1/2} = \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{\lambda}, \end{aligned} \quad (2.2.1.2)$$

где  $a$  - радиус сердцевинки оболочки,  $a=4,5$  мкм;  
 $n_1$  - показатель преломления сердцевинки,  $n_1=1,4681$ ;  
 $n_2$  - показатель преломления оболочки,  $n_2=1,4623$ .

$$V = 2 \cdot 3,14 \cdot 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,13}{(1,55 \cdot 10^{-6})} = 2,3702.$$

Произведем расчет параметров кабеля, исходя из того, что мы имеем одномодовые волокна со ступенчатым профилем показателя преломления с диаметром сердцевинки  $2a=9$  мкм и критической длиной волны  $\lambda=1250$  нм, диаметр поля моды  $2\omega_0$  при длине волны 1550нм.

$$2\omega_0 \approx (2,6 \cdot \lambda / V_c \lambda_c) \cdot 2a, \quad (2.2.1.3)$$

где  $\lambda$  - рабочая длина волны, нм;  
 $\lambda_c$  - критическая длина волны, выше которой в световоде направляется только основная мода, нм;  
 $V_c$  - критическая нормированная частота, для одномодового режима  $V_c=2,405$ .

$$2\omega_0 \approx (2,6 \cdot \frac{1550}{2,405} \cdot 1250) \cdot 9 = 12 \text{ мкм.}$$

Учитывая, что в световоде границей раздела сред сердцевина – оболочка являются прозрачные стёкла, возможно, не только отражение оптического луча, но и проникновение его в оболочку. Для предотвращения перехода энергии в оболочку и излучения в окружающее пространство необходимо соблюдать условие полного внутреннего отражения и апертуру. Известно, что при переходе из среды с большей плотностью в среду с меньшей плотностью, то есть при  $n_1 > n_2$ , волна при определённом угле падения полностью отражается и не переходит в другую среду. Угол падения, начиная с которого вся энергия отражается от границы раздела сред, при  $\varphi_p = \theta_v$ , называется углом полного внутреннего отражения:

$$\sin\theta = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sqrt{\frac{m_2 \cdot \epsilon_2}{m_1 \cdot \epsilon_1}}, \quad (2.1.1.4)$$

где  $m$  и  $\epsilon$  - соответственно магнитная и диэлектрическая проницаемости сердечника ( $m_1, \epsilon_1$ ) и оболочки ( $m_2, \epsilon_2$ ).

При  $\varphi_p$  меньше  $\theta_v$  преломлённый луч проходит вдоль границы раздела «серцевина – оболочка» и не излучается в окружающее пространство.

При  $\varphi_p$  больше  $\theta_v$  энергия, поступившая в сердечник, полностью отражается и распространяется по световоду. Чем больше угол падения волны,  $\varphi_p$  больше  $\theta_v$  в пределах от  $\theta_v$  до 90 градусов, тем лучше условия распространения и тем быстрее волна придёт к приёмному концу. В этом случае вся энергия концентрируется в сердечнике световода и практически не излучается в окружающую среду. При падении луча под углом, меньшим угла полного отражения,  $\varphi_p$  меньше  $\theta_v$ , энергия проникает в оболочку, излучается во внешнее пространство, и передача по световоду неэффективна.

Режим полного внутреннего отражения предопределяет условие подачи света на входной торец волоконного световода. Световод пропускает лишь свет, заключённый в пределах телесного угла  $\theta_a$ , величина которого обусловлена углом полного внутреннего отражения  $\theta_v$ . Этот телесный угол  $\theta_a$  характеризуется числовой апертурой:

$$NA = \sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = (1,4681^2 - 1,4623^2)^{\frac{1}{2}} = 0,13$$

Между углами полного внутреннего отражения  $\theta_v$  и апертурным углом падения луча,  $\theta_a$  имеется взаимосвязь. Чем больше угол  $\theta_v$ , тем меньше апертура волокна  $\theta_a$ . Следует стремиться к тому, чтобы угол падения луча на границу сердечник - оболочка  $\varphi_p$  был больше угла полного внутреннего

отражения  $\theta_v$  и находился в пределах от  $\theta_v$  до 90 градусов, а угол ввода луча в торец световода  $w$  укладывался в апертурный угол  $\theta_a$  ( $w < \theta_a$ ).

Найдем критический угол  $\theta_c$ , при котором еще выполняется условие полного внутреннего отражения

$$\theta_c = \sqrt{\left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \quad (2.1.1.5)$$

где  $n_1$  - показатель преломления сердцевинки,  $n_1 = 1,4681$ ;  
 $n_2$  - показатель преломления оболочки,  $n_2 = 1,4623$ .

$$\theta_c = \sqrt{\left(1 - \frac{1,4623}{1,4681}\right)^2} = 16^\circ$$

Зная показатели преломления оболочки  $n_2$  и сердцевинки  $n_1$  рассчитаем относительную разность показателей преломления  $\Delta$

$$\Delta = \frac{n_1 + n_2}{n_1}, \quad (2.1.1.6)$$

где  $n_1$  - показатель преломления сердцевинки,  $n_1 = 1,4681$ ;  
 $n_2$  - показатель преломления оболочки,  $n_2 = 1,4623$ .

$$\Delta = \frac{1,4681 + 1,4623}{1,4681} = 0,00395 \approx 0,395 \%$$

Рассчитаем SZ-структуру в ВОК:

Шаг поля полного оборота на  $360^\circ$  называется шагом скрутки  $S$ .

Угол между свиваемыми элементами и поперечным сечением кабеля называется углом скрутки  $\alpha$ . Расстояние между осью кабеля и серединой свиваемого элемента называется радиусом скрутки  $R$ .

Для данных видов кабеля шаг скрутки  $S = 170$  мм и радиус скрутки  $R = 4,3$  мм, тогда дополнительная длина  $Z$  будет равна

$$Z = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot R}{S}\right)^2} - 1\right) \cdot 100 \%, \quad (2.1.1.7)$$

$$Z = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 4,3}{170}\right)^2} - 1\right) \cdot 100 \% \approx 1,25 \%$$

Поэтому на каждые сто метров длины кабеля свиваемые элементы длиннее на 1,25 м. Угол скрутки равен

$$\alpha = \text{artag}\left(\frac{170}{2 \cdot 4,3 \cdot 3,14}\right) \approx 80,97 \% \quad (2.1.1.8)$$

Соответствующий радиус кривизны равен

$$\rho = R \cdot \left[1 + \left(\frac{s}{2 \cdot R \cdot \pi}\right)^2\right], \quad (2.1.1.9)$$

где  $R$  - радиус скрутки, м;  
 $s$  - шаг скрутки, м.

$$\rho = 4,3 \cdot \left[1 + \left(\frac{170}{2 \cdot 4,3 \cdot 3,14}\right)^2\right] \approx 175 \text{ мм.}$$

Наряду с изгибом необходимо ограничивать растяжение и сжатие световодов в жилах, с тем чтобы в заданных диапазонах нагрузок на растяжение и температурных диапазонах в ВОК не возникали недопустимые изменения передаточных характеристик и опасность повреждения световодов. Относительное изменение длины  $\Delta L/L$  ВОК, т.е. допустимое удлинение  $E_k$  или сжатие  $E_{тк}$  кабеля равно

$$E = 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{s^2} + 2 \left(\frac{\Delta R}{R} \pm \frac{\Delta R^2}{R^2}\right)}, \quad (2.1.1.10)$$

где знак «+» для сжатия кабеля  $E_{тк}$ ; знак «-» для удлинения кабеля  $E_k$ .

Так, зная номинальный внутренний диаметр оболочки  $\alpha_i = 2$  мм, 12 световодов со ступенчатым (дублированным профилем) показателя преломления имеют общий зазор

$$\Delta R = \frac{2,0 - 1,0}{2} = 0,5 \text{ мм}$$

Тогда максимальное допустимое удлинение кабеля равно формула (2.1.1.10)

$$E = 1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 4,3^2}{170^2} + 2 \cdot \left(\frac{0,5}{4,3} \pm \frac{0,5^2}{4,3^2}\right)}.$$

Модой называют разновидность волны, отличающейся структурой. Многомодовый характер поля означает, что электромагнитная волна,

распространяющаяся по оптическому волокну образована несколькими волнами разного типа. Достаточно знать нормированную частоту  $V$  для определения режима работы световода, так при  $V \leq 2,405$  – многомодовый, а в данной магистерской диссертации  $V = 2,3702$ , т.е. одномодовый. В общем виде число мод определяется

$$N = \frac{V(1 + \frac{2}{n})}{2}, \quad (2.1.1.11)$$

где  $n$  - показатель степени изменения профиля показателя преломления;  
 $V$  - нормированная частота.

ОК характеризуются двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией.

Затухание  $\alpha$  определяет длину регенерационных участков (расстояние между регенераторами) и для трактов оптических кабелей обусловлено собственными потерями в волоконных световодах  $\alpha_s$  и дополнительными потерями вызываемыми кабельными  $\alpha_k$ , обусловленные скруткой, а также изгибами световодов при наложении покрытий и защитных покрытия в процессе изготовления оптического кабеля.

Собственные потери ВС состоят в первую очередь из потерь поглощения  $\rho$  и потерь рассеяния  $\alpha_r$ . Механизм потерь, возникающих при распространении по волоконному световоду электромагнитной энергии объясняется так: часть мощности, поступающей на вход световода рассеивается вследствие изменения направления распространения лучей на нерегулярностях и их высвечивания в окружающее пространство ( $\alpha_p$ ), а другая часть мощности поглощается посторонними примесями, выделяясь в виде джоулева тепла ( $\alpha_p + \alpha_{pr}$ ).

Потери на поглощение зависят от чистоты материала и при наличии посторонних примесей ( $\alpha_{pr}$ ) могут достигать значительной величины ( $\alpha_p + \alpha_{pr}$ ).

Потери на рассеяние лимитируют предел минимально допустимых значений потерь в волоконных световодах. В результате:  $\alpha = \alpha_p + \alpha_r + \alpha_{pr} + \alpha_k$ .

Наряду с затуханием пропускная способность  $dF$  является важнейшим параметром ВОСП. Она определяет полосу частот пропускаемую световодом, и соответственно объём информации, который можно передавать по оптическому кабелю. Теоретически по волоконному световоду можно организовать огромное количество каналов для передачи информации на большие расстояния. Однако имеются значительные ограничения, обусловленные тем, что сигнал на вход приёмного устройства приходит искажённым, чем длиннее линия тем больше искажение. Данное явление носит название дисперсии и обусловлено различием времени распространения

различных мод в световоде и наличием частотной зависимости показателя преломления.

## 2.2.2 Расчет взаимных влияний в оптическом кабеле

Световоды, находящиеся в общем сердечнике ОК, могут оказывать воздействие на соседние волокна. Уровень взаимных помех в ОК зависит от конструкции кабельного сердечника, т.е. от взаимного расположения волокон.

Степень влияния между ОВ можно оценить, рассчитав вторичные параметры влияния от двух соседних волокон. Переходное затухание на ближнем конце рассчитывается по формуле

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4\alpha}{N^2 m (1 - e^{2\alpha L})} \right|, \quad (2.2.2.1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания ОВ, дБ/км;

$L$  - длина усилительного участка ОК, км;

$m$  - коэффициент связи между волокнами ( $m=0,6-0,7$ );

$N$  - коэффициент проникновения поля через оболочку волокна.

Защищенность от помех рассчитывается по формуле:

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{2}{N^2 mL} \right| \quad (2.2.2.2)$$

Переходное затухание на дальнем конце рассчитывается по формуле

$$A_1 = A_3 + \alpha L, \quad (2.2.2.3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания ОВ, дБ/км.

$$N = (g_{1,2} g_{23} \cdot e^{-kt}) / (1 - P_{1,2} P_{23} \cdot e^{-2kt}), \quad (2.2.2.4)$$

где  $k = \omega \sqrt{\mu_a \epsilon_a}$  - коэффициент потерь в оболочке;

$t$  - толщина оболочки ( $1 \div 3$  мкм);

$g_{12}$  и  $g_{23}$  - коэффициенты преломления на границе сердечника ( $n_1$ ), в оболочки ( $n_2$ ) и воздуха ( $n_3$ ).

$$\begin{aligned} g_{1,2} &= 2n_1/n_1 + n_2 \\ g_{23} &= 2n_2/n_2 + n_3 \end{aligned} \quad (2.2.2.6)$$

При параметрах ОБ:

$$t = 2, \text{ мкм};$$

$$\alpha = 2.52, \text{ дБ/км};$$

$$L=70, \text{ км};$$

$$f = 1,935^{14}, \text{ Гц};$$

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}, \text{ Ф/м};$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м};$$

$$\varepsilon = n^2;$$

$$\mu = 1.$$

Рассчитываем коэффициенты преломления на границе в оболочке и в воздухе по формуле

$$g_{12} = \frac{2 \cdot 1,4681}{1,4681 + 1,4623} = 1,002 \quad (2.2.2.6)$$

$$g_{2,3} = \frac{2 \cdot 1,4623}{1,4623 + 1} = 1,19$$

Находим вероятности преломления на границе сердечник – оболочка и оболочка воздух по формулам

$$P_{1,2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.2.2.7)$$

$$P_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}$$

$$P_{1,2} = \frac{1,4681 - 1,4623}{1,4681 + 1,4623} = 0,002,$$

$$P_{23} = \frac{1,4623 - 1}{1,4623 + 1} = 0,19$$

Найдем коэффициент потерь в оболочке по формуле (2.2.2.5)

$$k = \frac{2}{3} \pi \cdot 1.195 \cdot 10^{14} \cdot 1.4623 \cdot 10^{-8} = 4.901 \cdot 10^6$$

Найдем коэффициент проникновения поля через оболочку волокна по формуле (2.2.4)

$$N = \frac{1,002 \cdot 1,19 \cdot e^{-2 \cdot 1,16510^6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}}{1 - 0,002 \cdot 0,19 \cdot e^{-2 \cdot 1,16510^6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}} = 6,59 \cdot 10^{-5}$$

Найдем переходное затухание на ближнем конце рассчитывается по формуле (2.2.5)

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{4 \cdot 2,52}{(4,22 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,6 \cdot (1 - e^{2 \cdot 2,52 \cdot 10})} \right| = 157,027 \text{ дБ/км}$$

Найдем защищенность от помех по формуле (2.2.2.5)

$$A_3 = 20 \lg \left| \frac{2}{(4,22 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,6 \cdot 10} \right| = 137,702 \text{ дБ}$$

Найдем переходное затухание на дальнем конце рассчитывается по формуле (2.2.6)

$$A_1 = 137,702 + 2,52 \cdot 10 = 389,702 \text{ дБ}$$

$N$  характеризует долю просачивания энергии через оболочку волокна и, если он меньше  $10^{-5}$ , то для используемых на практике ОВ и величин  $L - A_0 > 120$  дБ;  $A_3 > 90$  дБ;  $A_1 > 120$  дБ их взаимными влияниями можно пренебречь.

Все расчеты выполнены в программе MathCAD (приложение Б).

### 2.2.3 Расчет дисперсии

Любой ВО световод характеризуется таким немаловажным параметром как дисперсия [23].

Дисперсия – это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала. Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса при прохождении по ОК.

Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон использования световодов, но и снижает дальность передачи по ОК, так как чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульса.



Различают три вида дисперсии волоконного световода: межмодовая, материальная и волноводная. Модовая дисперсия возникает при распространении в световоде нескольких мод. В одномодовых световодах модовая дисперсия отсутствует. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления материала сердечника от длины волны. Волновая дисперсия объясняется зависимостью постоянной распространения от длины волны, т.к. источник излучения излучает не строго одну длину волны  $\lambda$ , а некоторый спектр волн, который характеризуется значением спектральной ширины источника  $\Delta\lambda$ .

Произведем расчет длины участка регенерации с учетом дисперсии и затухания и проанализируем расчеты.

Дисперсионное уширение импульса определим

$$\tau = \Delta\lambda \cdot D(\lambda), \quad (2.2.3.1)$$

$$\tau = 0,1 \cdot 18 = 1,8 \text{ пс/км}$$

Удельная полоса пропускания

$$W = \frac{0,44}{\tau}, \quad (2.2.3.2)$$

где  $\tau$  - дисперсионное уширение импульса

$$W = \frac{0,44}{1,8 \cdot 10^{-12}} = 244444 \text{ МГц}$$

Длину РУ найдем

$$L = \frac{W}{\Delta f(\lambda)}, \quad (2.2.3.4)$$

где  $W$  - удельная полоса пропускания, МГц;

$\Delta f(\lambda)$  - ширина спектра импульса, МГц.

$$L = \frac{244444}{3125} = 78,2 \text{ км}$$

Материальная дисперсия определяется

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta\lambda \cdot M, \quad (2.2.3.5)$$

где  $M$  - коэффициент удельной материальной дисперсии; для плавленного кварца ( $M = 0,3098$ );

$\Delta\lambda$  - спектральная ширина лазера ( $\Delta\lambda=5$  нм).

Определим по формуле (2.2.3.5)

$$\tau_{\text{мат}} = 0,5 \cdot 10^{-9} \cdot 0,3098 = 1,549 \cdot 10^{-10} \text{ с/км}$$

Определим волноводную дисперсию для ступенчатого световода

$$\tau_{\text{вв}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2 \cdot n_1^2 \cdot \Delta}{c}, \quad (2.2.3.6)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме ( $3 \cdot 10^8$  км/с);

$\Delta\lambda$  - ширина импульса лазера, нм;

$\lambda$  - длина волны, нм;

$\Delta$  - показатель преломления.

$$\tau_{\text{вв}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-9}}{1,55 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{2 \cdot 1,4675^2 \cdot 0,003}{3 \cdot 10^8} = 1,39 \cdot 10^{-9} \text{ с/м}$$

Суммарная дисперсия для одномодового ВО световода определяется суммой материальной и волноводной дисперсий

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{вв}} + \tau_{\text{мат}} \quad (2.2.3.7)$$

С помощью общей дисперсии можно определить ширину пропускания световода  $\Delta F$

$$\Delta F = \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \quad (2.2.3.8)$$

Определим ширину пропускания световода по формуле (2.2.3.8)

$$\Delta F = \frac{1}{1,688 \cdot 10^{-9}} = 0,59 \text{ ГГц/км.}$$

Из расчетов следует, что существующий кабель марки А-DF(ZN)2Y 3x4 E9/125 0,22Н18 подходит для передачи SDH потоков для передачи информации.

Значения дисперсии и потерь не превышают стандартов качественной передачи по оптическому волокну.

### 3 Экспериментальная часть

Эксперимент проводился на оборудовании компании ТОО «Eventis Telecom Kazakhstan» - оператора междугородней и международной связи в Казахстане. Компания предоставляет услуги посредством мультисервисной сети нового поколения (NGN), включающую в себя интеллектуальную платформу (IN) [26].

Анализ проводился на основе загрузки каналов при прохождении однородного IP-трафика в среднем равного по объему за определенный промежуток времени. При тестировании использовалась программа «NETFLOW» [27].

NetFlow Analyzer – это программное обеспечение для анализа пропускной способности. Оно помогает администраторам получить сведения о том, кем, чем, где, когда и как распределяется скорость, и кроме того, является удобным инструментом для мгновенной сетевой диагностики.

Предприятия по всему миру обращаются к NetFlow Analyzer, когда необходимо оптимизировать работу их сетей до максимальной производительности. NetFlow Analyzer дает обзор сети в режиме реального времени и понимание того, как трафик воздействует на состояние сети в целом. Полученная информация позволяет моментально определить причину сетевых инцидентов, распланировать загрузку. NetFlow предоставляет полную детализацию, показывает какой пропускной способностью пользуются приложения и клиенты.

В данном случае, с помощью «NETFLOW» были сняты параметры загрузки канала, скорости, и объема переданной информации на конечном оборудовании маршрутизатора Catalyst при разных пропускных способностях спутникового и наземного каналов связи.

Схема организации связи междугороднего уровня с применением спутниковых и наземных каналов Eventis Telecom представлена в Приложении В.

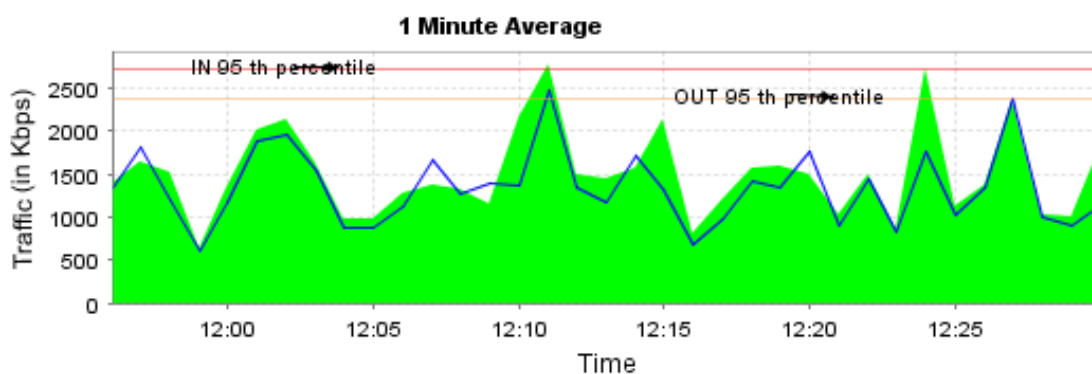
В процессе эксперимента измерялся IP-трафик. Эксперимент проводился в течение 10 рабочих дней. Первые 5 дней при одинаковых пропускных способностях спутникового и наземного каналов по 2048 кбит/с. Следующие 5 дней при пропускных способностях 2048 кбит/с спутникового канала и 1024 кбит/с наземного канала.

В результате проведенных испытаний получены графики (рисунки 8-17), показывающие зависимость скорости передачи и объема трафика от времени, при разных значениях пропускных способностей оптического и спутникового канала. Измерения проводились в течение 30 минут, через каждые 2 минуты. Результаты измерения приведены в таблице 5. На основе данных измерений для подтверждения правильности, проведенных испытаний, определены математическое ожидание и дисперсия и построены графики изменения данных величин в течение 10 дней эксперимента. Полученные графики показывают, что объем трафика и скорость передачи

уменьшается в 2 раза, при уменьшении пропускной способности оптического канала в 2 раза по сравнению с пропускной способностью спутникового канала.

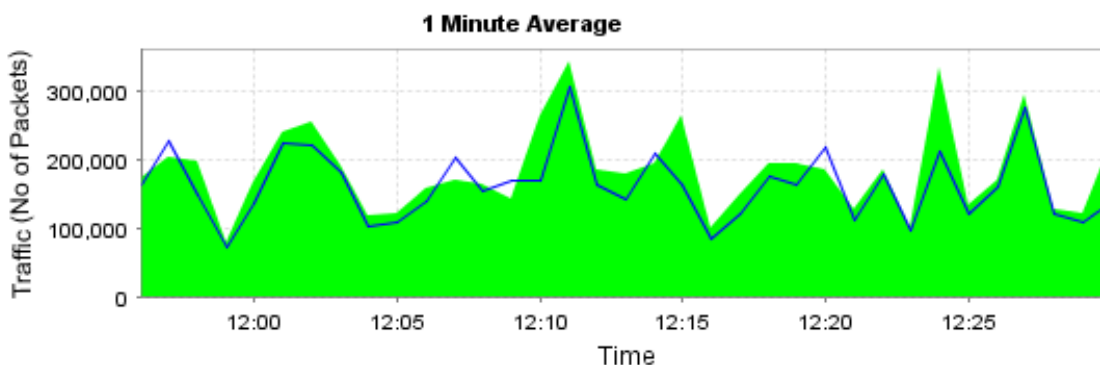
На основе проведенного эксперимента можно сделать вывод: для получения высокой эффективности интегрированной системы связи необходимо иметь линии связи, входящие в состав данной системы, с максимальной и одинаковой пропускной способностью.

### Эксперимент 1-1



Category	Total	Max	Min	Avg
IN	391.7 MB	2.77 Mbps	644.42 Kbps	1.49 Mbps
OUT	351.71 MB	2.46 Mbps	610.49 Kbps	1.33 Mbps

#### а) Зависимость скорости передачи данных от времени

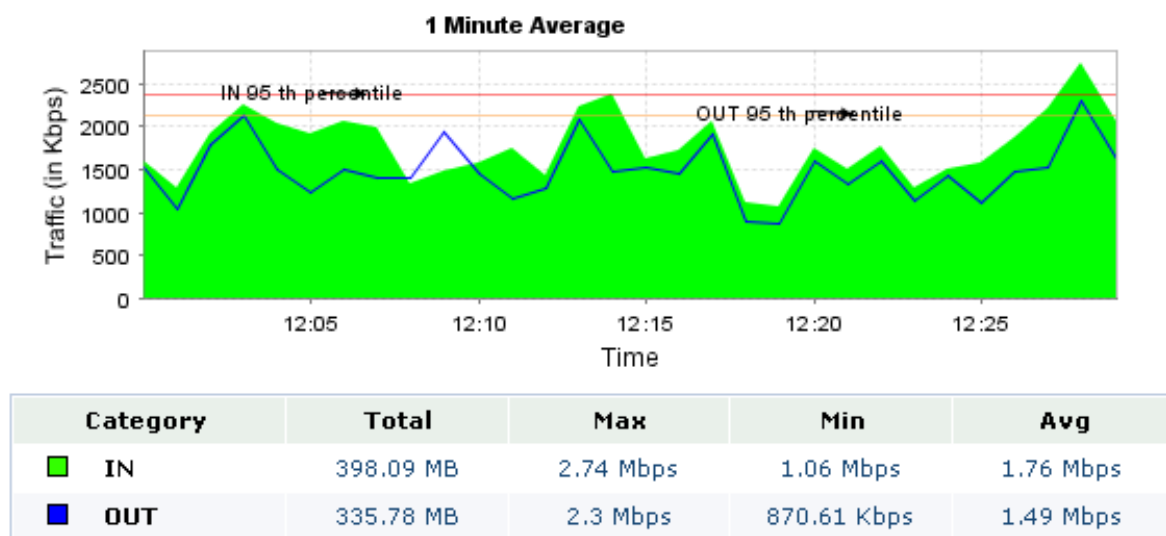


Category	Total	Max	Min	Avg
IN	6449546.0	344029.0	79675.0	184272.74
OUT	5707659.0	306767.0	74138.0	163075.97

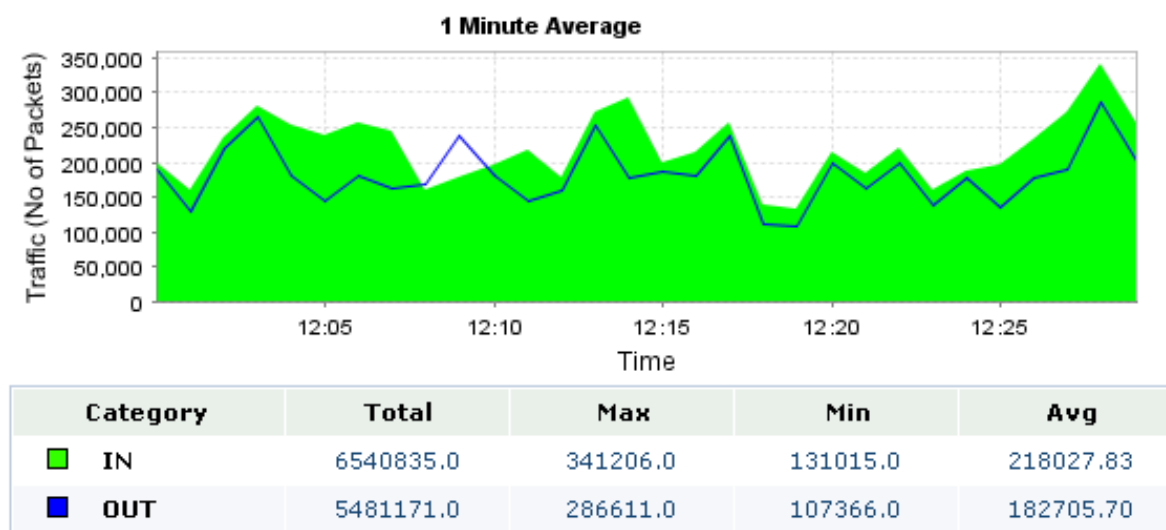
#### б) Зависимость объем трафика от времени

Рисунок 8 – Эксперимент 1-1 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 2048кбит/с)

## Эксперимент 1-2



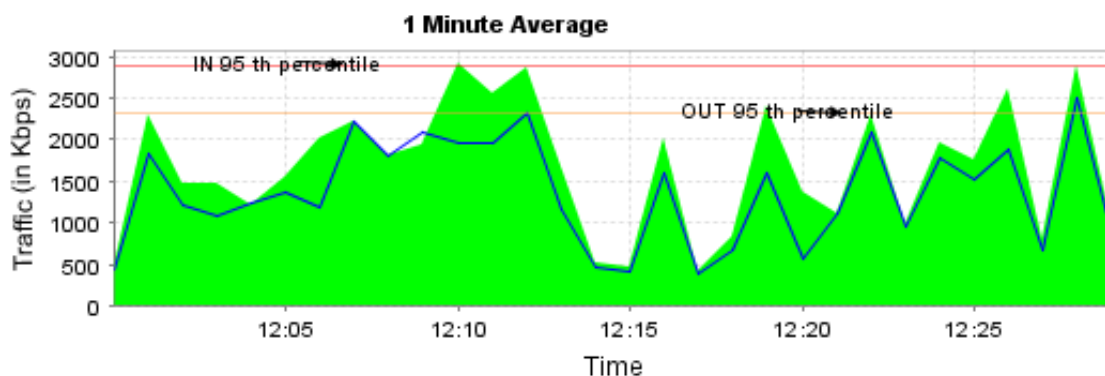
а) Зависимость скорость передачи данных от времени



б) Зависимость объема трафика от времени

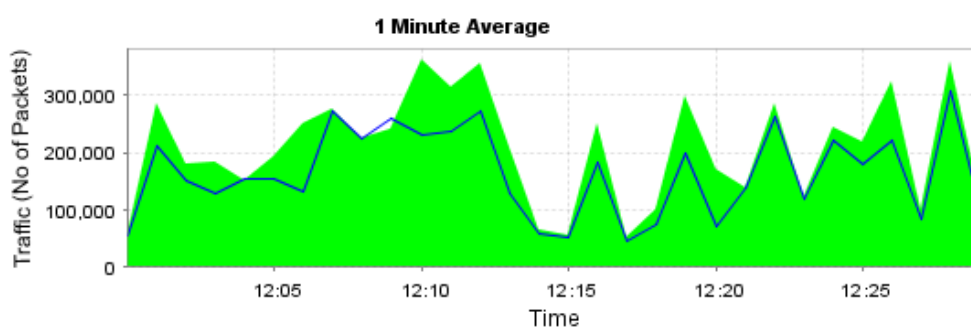
Рисунок 9 – Эксперимент 1-2 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 2048кбит/с)

## Эксперимент 1-3



Category	Total	Max	Min	Avg
IN	372.73 MB	2.92 Mbps	415.32 Kbps	1.65 Mbps
OUT	306.53 MB	2.5 Mbps	377.12 Kbps	1.36 Mbps

а) Зависимость скорости передачи данных от времени

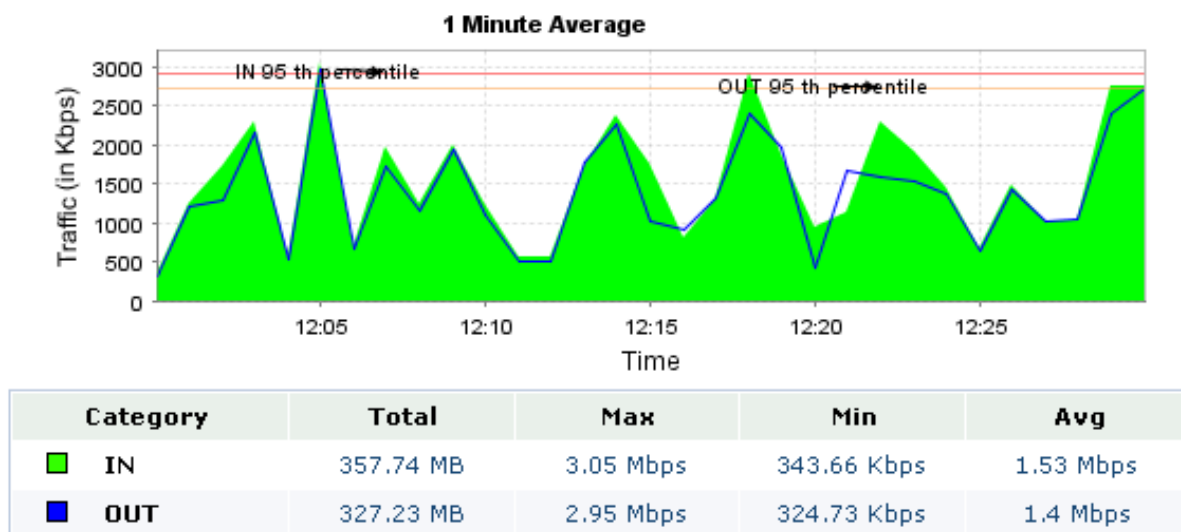


Category	Total	Max	Min	Avg	95th Percentile
IN	6162966.0	362954.0	51179.0	205432.20	-
OUT	4909522.0	305945.0	46156.0	163650.73	-

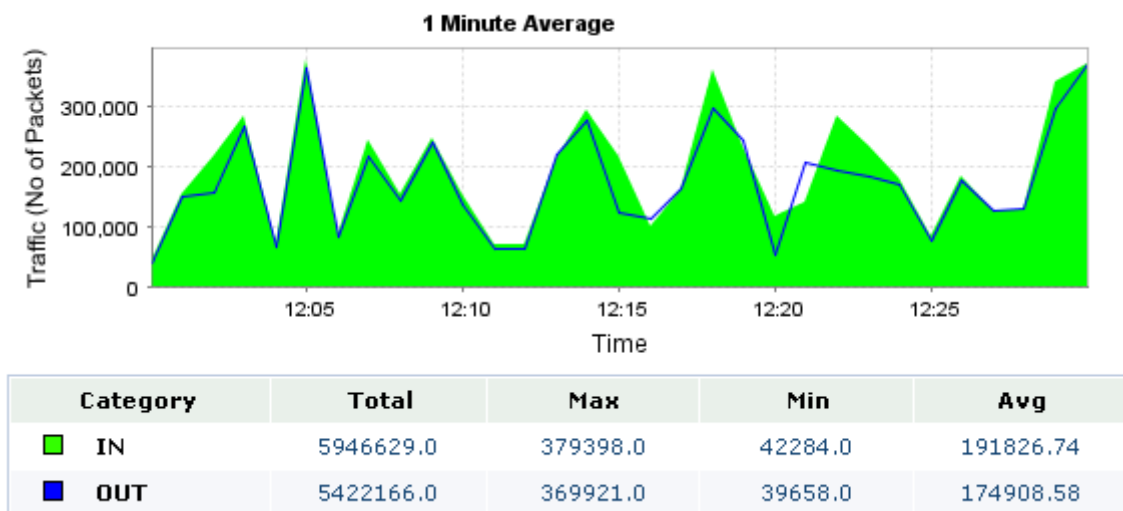
б) Зависимость объем трафика от времени

Рисунок 10 – Эксперимент 1-3 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 2048кбит/с)

## Эксперимент 1-4



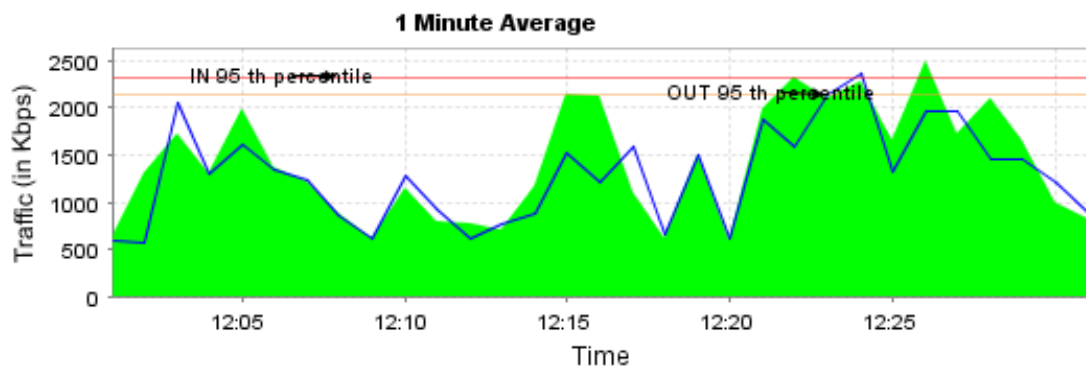
а) Зависимость скорости передачи данных от времени



б) Зависимость объем трафика от времен

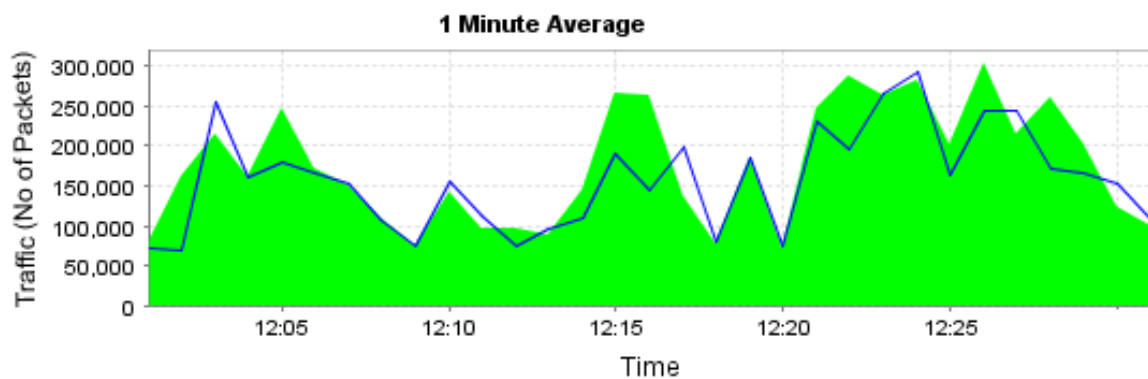
Рисунок 11 – Эксперимент 1-4 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 2048кбит/с)

## Эксперимент 1-5



Category	Total	Max	Min	Avg
IN	328.71 MB	2.5 Mbps	605.19 Kbps	1.41 Mbps
OUT	299.89 MB	2.35 Mbps	572.02 Kbps	1.28 Mbps

а) Зависимость скорости передачи данных от времени



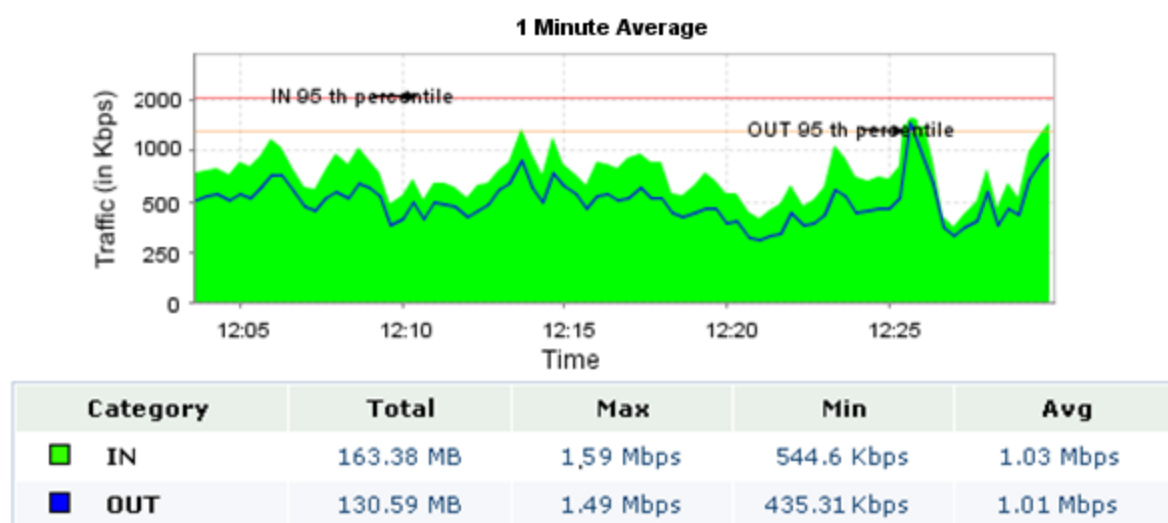
Category	Total	Max	Min	Avg
IN	5419225.0	304065.0	72200.0	174813.71
OUT	4901761.0	293350.0	70496.0	158121.32

б) Зависимость объема трафика от времени

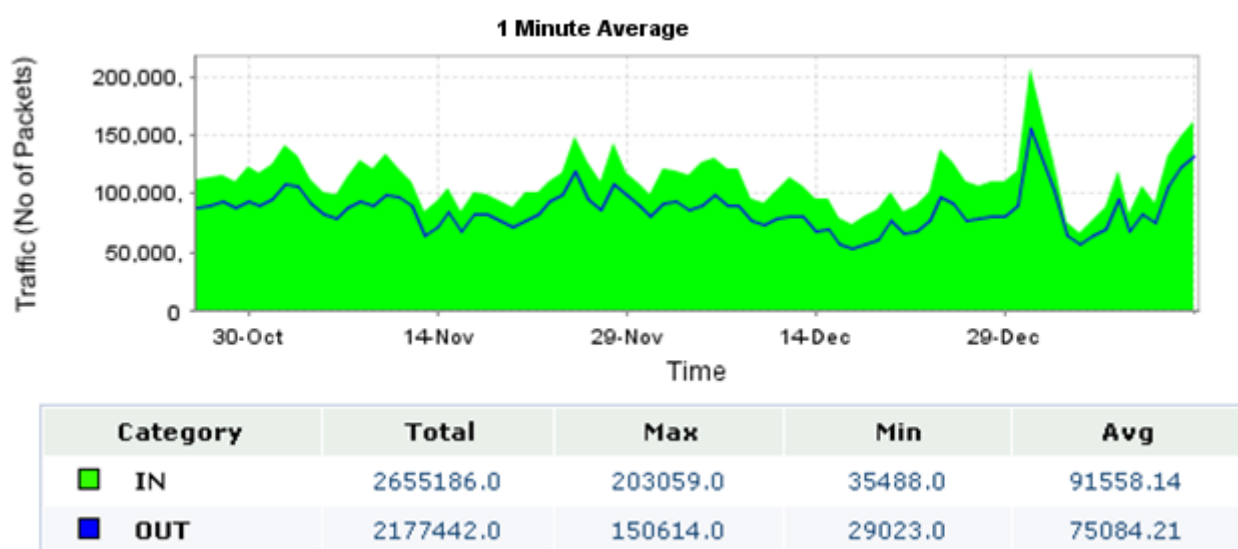
Рисунок 12 – Эксперимент 1-5 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 2048кбит/с)



## Эксперимент 2-1



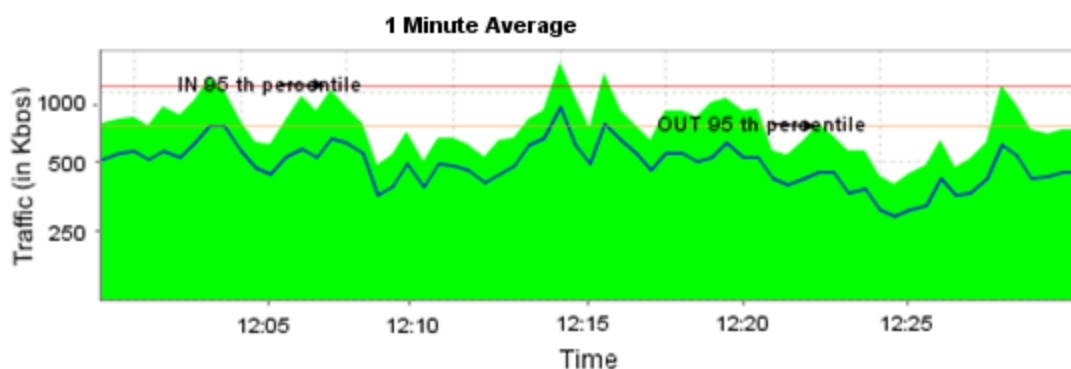
а) Зависимость скорости передачи данных от времени



б) Зависимость объема трафика от времени

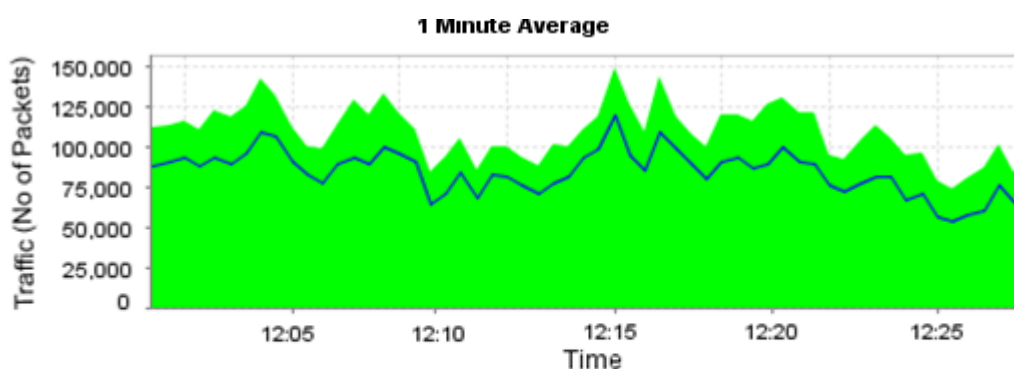
Рисунок 13 – Эксперимент 2-1 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 1024кбит/с)

## Эксперимент 2-2



Category	Total	Max	Min	Avg
IN	168.38 MB	1.49 Mbps	444.6 Kbps	0.93 Mbps
OUT	140.59 MB	1.39 Mbps	335.31 Kbps	0.91 Mbps

а) Зависимость скорости передачи данных от времени

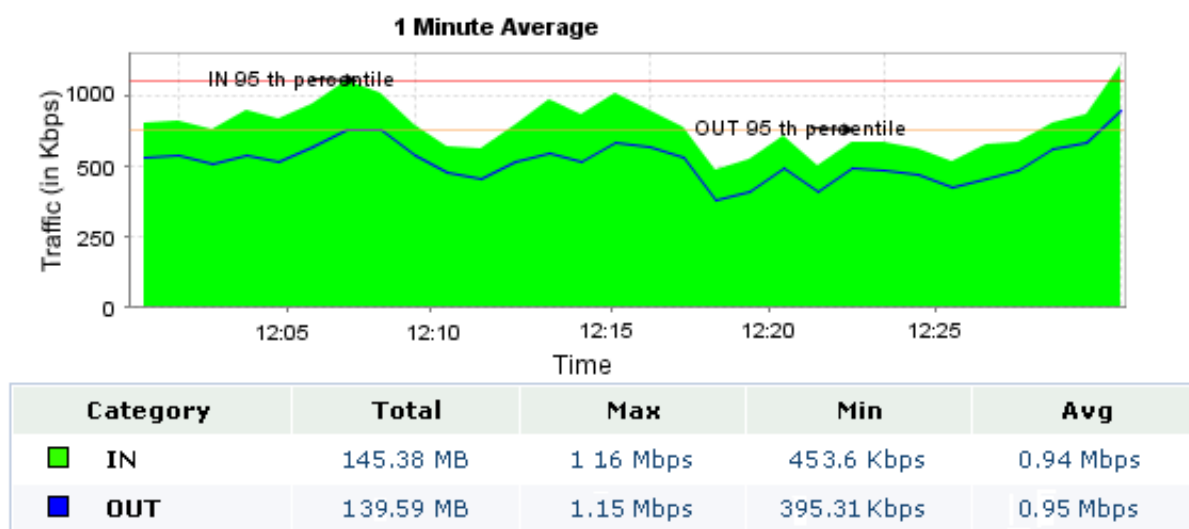


Category	Total	Max	Min	Avg
IN	2595186.0	150059.0	88488.0	91558.14
OUT	2237442.0	130614.0	74023.0	86084.21

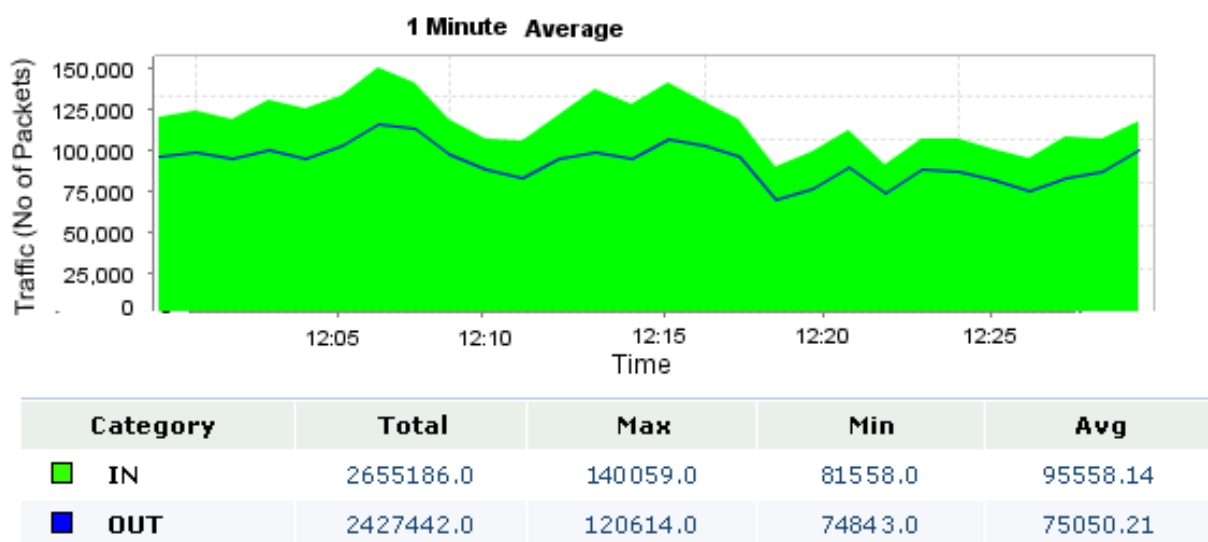
б) Зависимость объема трафика от времени

Рисунок 14 – Эксперимент 2-2 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 1024кбит/с)

## Эксперимент 2-3



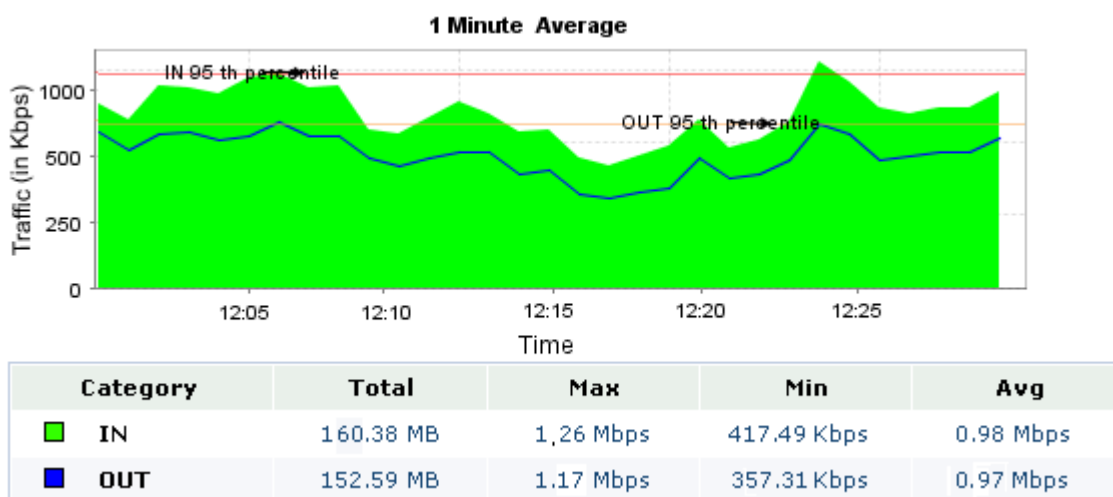
а) Зависимость скорость передачи данных от времени



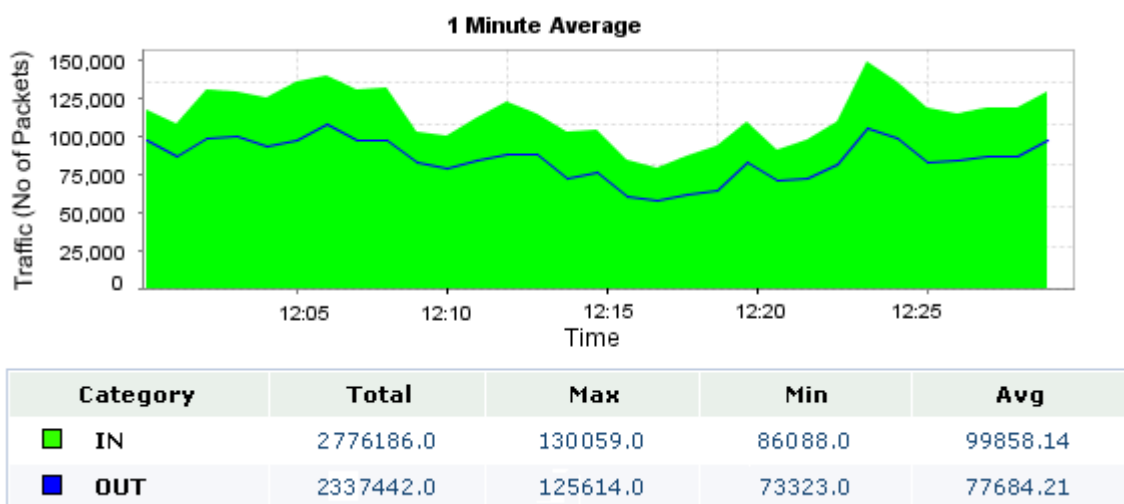
б) Зависимость объема трафика от времени

Рисунок 15 – Эксперимент 2-3 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 1024кбит/с)

## Эксперимент 2-4



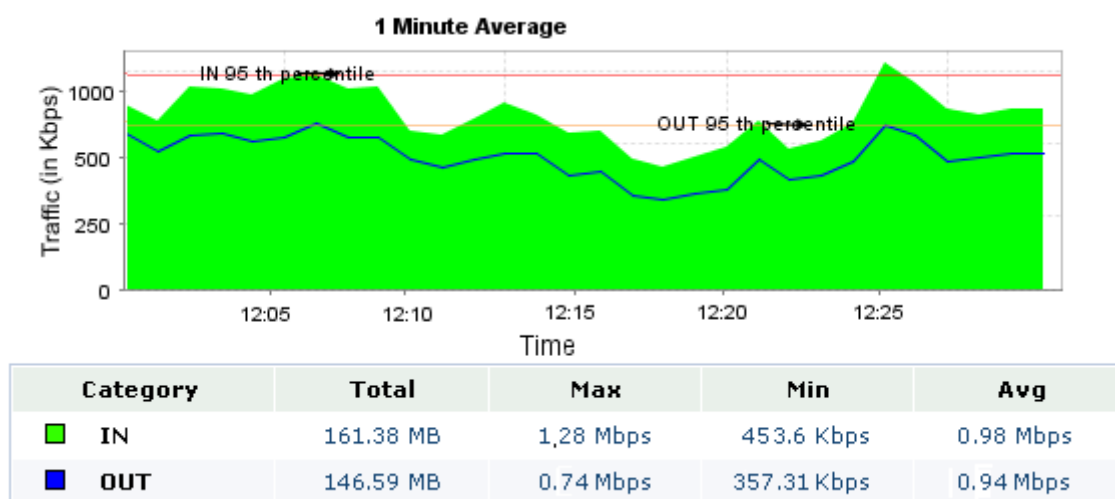
а) Зависимость скорости передачи данных от времени



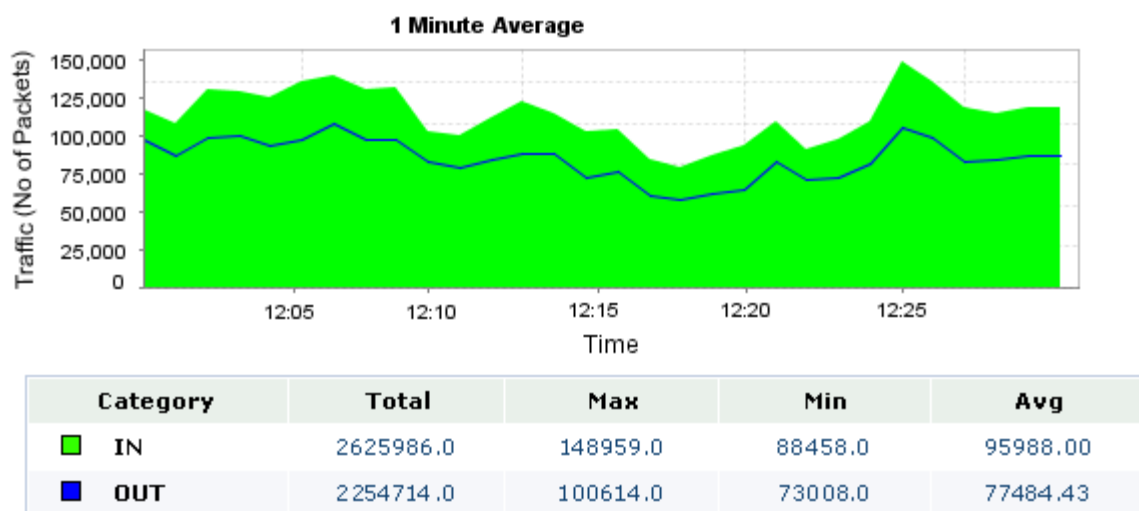
б) Зависимость объем трафика от времени

Рисунок 16 – Эксперимент 2-4 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 1024кбит/с)

## Эксперимент 2-5



а) Зависимость скорости передачи данных от времени



б) Зависимость объем трафика от времени

Рисунок 17 – Эксперимент 2-5 (пропускная способность спутникового канала 2048 кбит/с / наземного канала 1024кбит/с)

Из графиков, представленных выше, можно заключить, что при одинаковых пропускных способностях спутникового и наземного каналов скорость передачи информации колеблется в пределах от 1,3Мбит/с до 1,8Мбит/с. Количество пакетов в среднем составляет около 200000 пакет/мин. При данной пропускной способности качество голоса хорошее.

При уменьшении пропускной способности наземного канала в половину, соответственно уменьшается скорость передачи информации, она колеблется в пределах от 0,9Мбит/с до 1,03Мбит/с. Количество пакетов в

среднем составляет около 100000 пакетов/мин, качество ухудшается, вследствие большой потери пакетов. Вследствие этого резко снижается качество голоса, большая потеря пакетов. Т.е. при изменении пропускной способности отдельного участка сети, в данном случае наземного участка, уменьшилась скорость сети в целом. Для обеспечения пользователей хорошим качеством и скоростью необходимо рассчитывать оптимальное соотношение пропускных способностей каналов, как спутниковых и наземных.

Результаты обработки графиков значения скорости передачи информации, измеренные каждые две минуты, сведены в таблицу (приложение А).

Из таблицы 5 наглядно видно, что с 6-10 эксперимент скорость передачи информации уменьшилась практически в два раза. Также количество переданных и принятых пакетов уменьшилось вдвое.

### 3.1 Расчет математического ожидания и дисперсии

По данным таблице рассчитаем математическое ожидание и дисперсию распределения скорости передачи информации.

Математическое ожидание — мера среднего значения случайной величины в теории вероятностей [28].

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i \quad (3.3.1)$$

Дисперсия находится по формуле

$$D(x) = p_i (x_i - M_x)^2 \quad (3.3.2)$$

Листинг расчета  $M(x)$ ,  $D(x)$  представлен в приложение Г.

Т а б л и ц а 6 - Значения  $M(x)$

$M(x)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
In	1,588	1,904	1,73	1,44	1,4	0,84	0,875	0,795	0,903	0,89
Out	1,454	1,59	1,623	1,43	1,36	0,752	0,682	0,598	0,623	0,627

Т а б л и ц а 7 – Значения  $D(x)$

$D(x)$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
In	0,162	0,168	0,358	0,32	0,252	0,073	0,11	0,02	0,043	0,024
Out	0,131	0,062	0,284	0,308	0,33	0,039	0,033	0,012	0,014	0,017

Более наглядно результаты расчета представлены на рисунках (18-19)

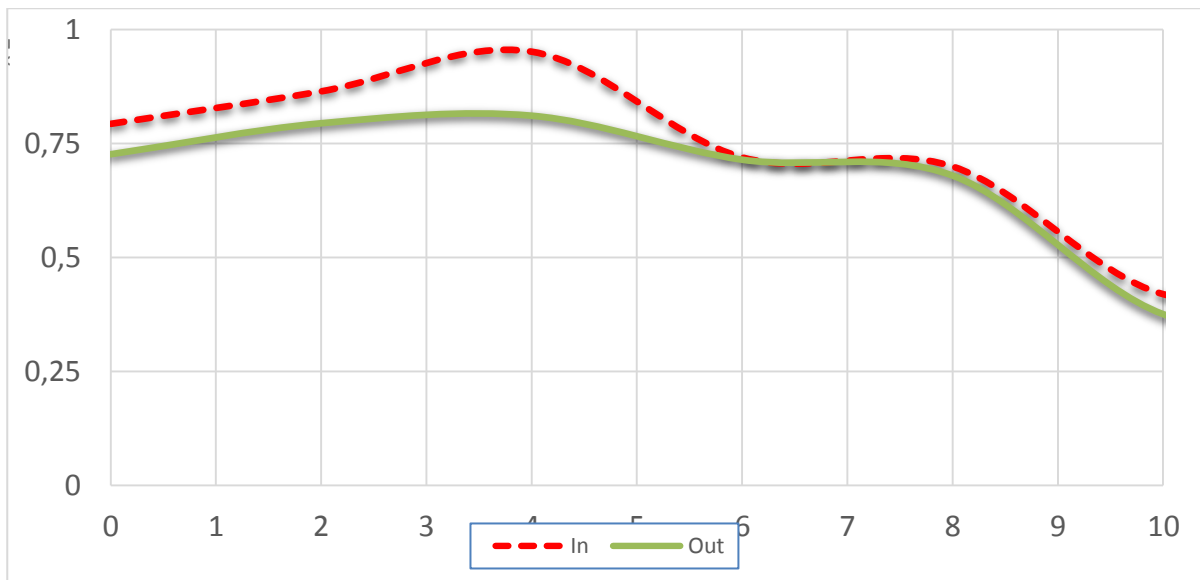


Рисунок 18 - Результат расчета  $M(x)$

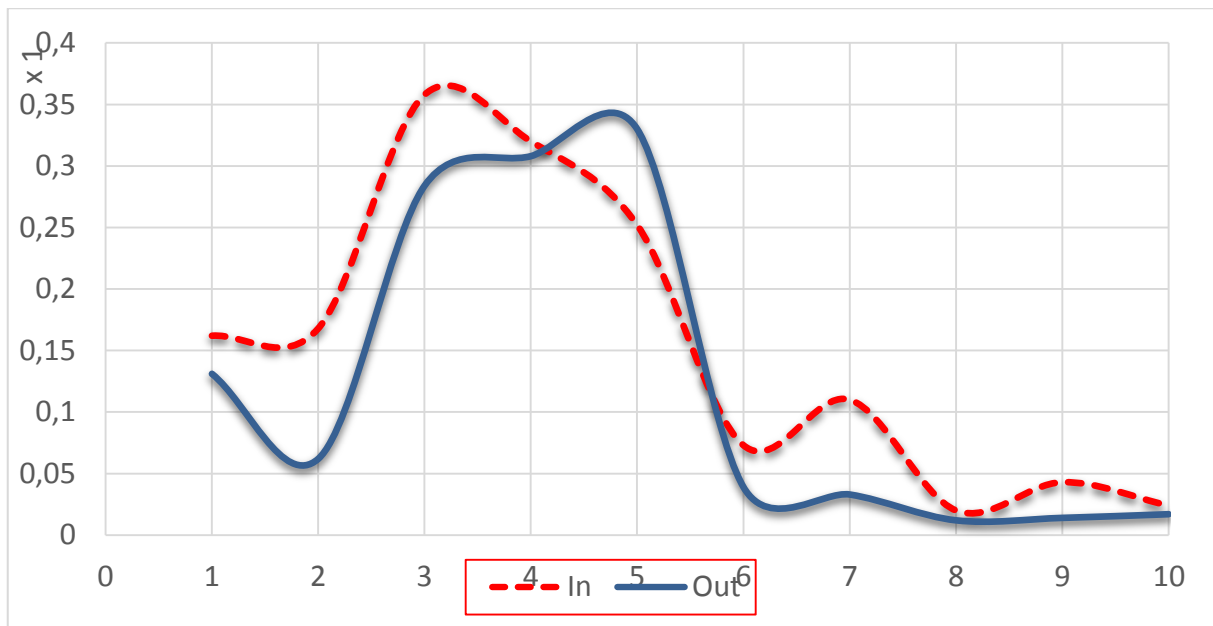


Рисунок 19 - Результат расчета  $D(x)$

Результаты расчета  $M(x)$  и  $D(x)$  показывают, что распределение скорости передачи информации в проведенных экспериментах является равномерным, т.е. подтверждают правильность проведения экспериментов и полученных результатов. При расчете первых 5 экспериментов разброс  $M(x)$  составляет 0,93, а  $D(x)$  0,25.

## Заключение

Целью данной магистерской работы было исследование 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 теоретическим расчетом. Практический эксперимент заключался в изменении пропускных способностей спутниковых и наземных каналов, и выяснения влияния изменений на скорость и объем трафика передачи информации. Экспериментальное исследование позволит осуществить выбор необходимых каналов связи для построения интегрированной сети связи с высоким качеством обслуживания.

В теоретической части был произведен расчет задержки. На базе математической модели была рассчитана задержка сети в зависимости от количества спутников и пропускной способности спутникового и наземного каналов. Результаты расчетов показывают, что с ростом пропускной способности каналов связи, входящих в систему связи, уменьшается общая задержка интегрированной сети. Уменьшение количества спутников, входящих в систему связи, вызывает увеличение нагрузки на спутниковый канал, что приводит к увеличению общей задержки сети.

В практической части приводится описание эксперимента, 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. Нейман В.И. Дальнейшая интеграция сетей связи//Электросвязь. - №6. 2007. – 369с.
2. Спирин А. А. Статья: Введение в технику волоконно-оптических сетей.2007г.-278с.
3. Сайт [http:// vimcom.ru/optic /](http://vimcom.ru/optic/)
4. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. - М.: Радио и Связь, 1990.-346с.
5. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. - М.: Лань, 2010.-389с.
6. Конин В.В. Спутниковые системы и технологии. – М.: Оборонгиз, 2002.-479с.
7. Сайт <http://www.teralink.ru>
8. Спутниковая связь и вещание. Коллектив ООО «Гротеск», 2009.-175с.
9. Самарский П.А. Основы структурированных кабельных систем. – М.: ДМК пресс, Компания АйТи, 2005.-169с.
10. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы 2-ое изд. – М.: ДМК пресс, 2002.-340с.
11. Сайт <http://www.madex.ru/service/articles/sks/>
12. Николаев А.А. Локальные проводные сети// Компьютер-Информ.- №1 . – 2003.-275с.
13. Сайт <http://sintez-n.ru/activities/net/rrl/>
14. Сайт <http://www.rrl.newmail.ru/index.html>
15. Григорчак О.А. ЦРЛС: расширяя границы возможного// Connect/ - №2. – 2005.-170с.
16. Камнев В.Е. Интеграция низкоорбитальных спутниковых и сотовых сетей связи с использованием протоколов физического и канального уровней. -М.: Стокгольм: Сотовая связь XXI века,1999.-188с.
17. Крупнов А.Е., Соколов Н.А. Калистратов Д.Ю. Широков Т.О. Новые телекоммуникационные технологии в отрасли связи// Электросвязь. - № 11. - 2009.-356с.
18. Группа РЦБ. Спутниковые коммуникации// Издательский дом. - №10.-280с.
- 19.Сайт <http://www.satellite.ru/activities/> Roddy B. Satellite Communications. McGraw-Hill Telecommunications, 2001.-224с.
20. Чечин Г.В., Колышко Е.В. Оптимизация параметров алгоритмов резервирования при обеспечении непрерывности соединений и переназначении каналов в низкоорбитальных сетях связи. - М.: Спутниковая связь, 1998.-265с.
21. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М.: Радио и связь, 2003.-193с.
22. Спутниковая связь и вещание: Справочник/Под ред. Л.Я.Кантора. — М.: Радио и связь, 1988.-310с.

23. Клочковская Л.П. Спутниковые системы радиосвязи и телевидения. – Алматы: АИЭС, 2007.-196с.
24. Бутусов М.М. и др. "Волоконно-оптические системы передачи"-М.; Радио и Связь,1992.-75с.
25. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие. - М.: Альпина Паблишер, 2004.-336с.
26. Утегалиев Д. Ж. Интегрированные сети связи// Вестник. - №2. – 2014.-4с.
27. Сайт <http://evtelecom.kz>
28. Сайт <http://news.ferra.ru/soft/2009/07/03/88507/>
29. Сайт [http://matlab.exponenta.ru/statist/book3/1\\_2.php](http://matlab.exponenta.ru/statist/book3/1_2.php)

## Приложение А

№ Experiment	in/out	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1 день	In	1,002	2,016	1,001	1,306	1,405	2,058	1,535	2,013	0,918	1,672	1,52	1,112	1,25	1,987	1,32	1,712
	Out	0,987	1,986	0,857	1,215	1,403	1,501	1,408	1,61	0,912	1,659	1,618	1,11	1,25	1,986	1,321	1,001
2 день	In	1,547	2,25	1,834	2,1	1,498	1,52	1,677	2,501	1,718	1,201	1,75	1,45	1,378	1,575	2,511	2,011
	Out	1,5	2,103	1,433	1,495	1,478	1,501	1,32	1,601	1,619	1,11	1,575	1,376	1,326	1,42	1,289	1,812
3 день	In	0,502	2,001	1,403	2,006	2,005	2,81	0,71	0,535	1,525	2,353	1,405	1,356	1,898	2,115	2,3	1,1
	Out	0,493	1,987	1,385	1,25	2,02	2,003	1,989	0,405	1,475	2,225	0,738	1,181	1,754	2,078	2,215	1,159
4 день	In	0,353	1,203	1,408	0,65	2,005	1,112	0,653	2,02	0,938	1,503	1,38	1,503	1,12	1,511	1,002	2,84
	Out	0,328	1,192	1,405	0,638	1,982	1,003	0,638	2,011	0,989	1,5	1,38	1,503	1	1,49	1,523	2,87
5 день	In	0,75	1,43	1,31	1,405	0,698	1,37	0,76	1,12	1,48	1,5	0,62	2,01	2,203	2,5	1,92	1
	Out	0,61	0,62	1,31	1,42	0,69	1,395	0,768	0,91	1,43	1,49	0,618	2,025	2,18	2,004	1,91	1,02
6 день	In	0,853	0,862	0,892	0,103	0,853	0,672	0,712	1,078	0,802	0,762	0,538	0,425	0,868	1,14	0,858	1,24
	Out	0,511	0,625	0,639	0,983	0,678	0,603	0,638	0,918	0,734	0,603	0,421	0,392	0,739	0,988	0,822	0,989
7 день	In	0,798	0,982	1,52	1,48	0,651	0,658	0,601	0,92	0,758	0,952	0,638	0,635	0,511	0,495	0,698	0,839
	Out	0,504	0,638	1,04	0,983	0,633	0,532	0,582	0,678	0,539	0,903	0,552	0,546	0,452	0,591	0,521	0,545
8 день	In	0,612	0,778	0,812	0,922	0,636	0,753	0,598	0,75	0,83	0,621	0,601	0,658	0,638	0,638	0,839	1,24
	Out	0,513	0,523	0,628	0,758	0,462	0,501	0,438	0,521	0,628	0,492	0,48	0,473	0,511	0,495	0,698	0,858
9 день	In	0,843	1,002	0,989	1,283	0,723	0,71	0,752	0,728	0,52	0,545	0,752	0,652	1,48	0,78	0,79	1
	Out	0,725	0,643	0,628	0,752	0,538	0,498	0,502	0,512	0,372	0,493	0,532	0,488	0,78	0,61	0,632	0,652
10 день	In	0,832	1,02	1,004	1,088	1,024	0,754	0,734	0,74	0,512	0,68	0,752	0,81	0,85	0,91	0,82	0,83

## Приложение Б

### Расчет взаимных влияний в кабеле, выполненных в программе «Mathcad»

The screenshot shows the Mathcad Professional interface with a document titled "Mathcad Professional". The main content area contains the following text and equations:

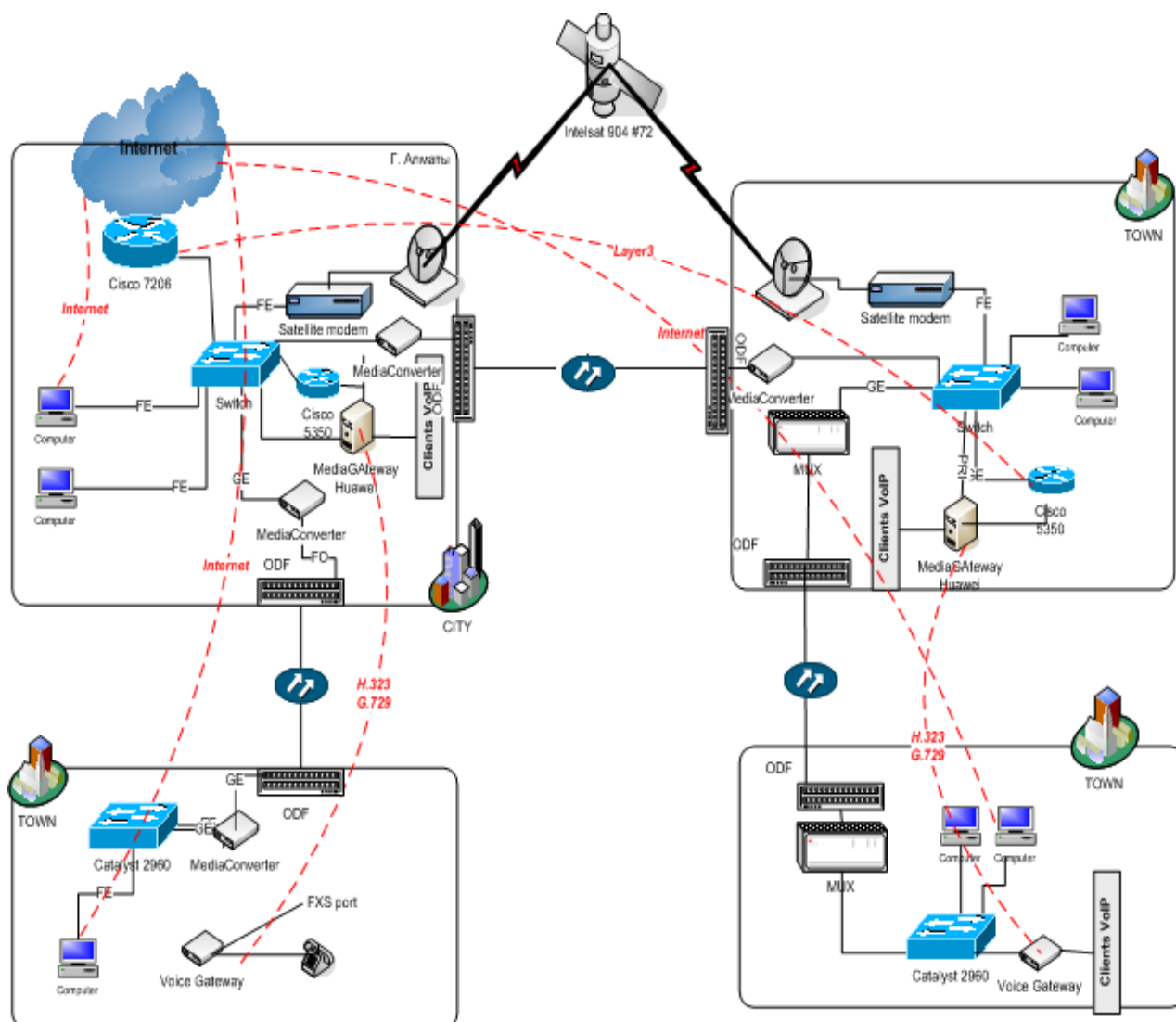
Расчет взаимных влияний в оптическом кабеле

$l := 100$	длина усилительного участка
$m := 0.6$	коэффициент связи между волокнами
$\alpha := 2.52$	коэффициент затухания ОВ
$t := 2 \cdot 10^{-6}$	толщина оболочки
$f := 1.935 \cdot 10^{14}$	средняя частота
$n1 := 1.4681$	показатель преломления на границе сердечника
$n2 := 1.4623$	показатель преломления на границе оболочки
$n3 := 1$	показатель преломления на границе воздуха
$\epsilon_0 := \frac{10^{-9}}{36\pi}$	$\mu := 1$ $\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ диэлектрическая и магнитная проницаемость
$P12 := \frac{n1 - n2}{n1 + n2}$	вероятность преломления на границе сердечник - оболочка
$P12 = 1.979 \times 10^{-3}$	
$P23 := \frac{n2 - n3}{n2 + n3}$	вероятность преломления на границе оболочка - воздух
$P23 = 0.188$	
$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$	круговая частота

At the bottom of the window, there is a status bar with the text "Press F1 for help.", "AUTO", and "Page 2".

## Приложение В

### Схема организации сети «Eventis Telecom Kazakhstan»



## Приложение Г

### Расчет $M(x)$ и $D(x)$ в Excel

Т а б л и ц а В 1 – Результаты эксперимента

№ Experiment	in/out	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1	In	1,002	2,016	1,001	1,306	1,405	2,058	1,535	2,013	0,918	1,672	1,52	1,112	1,25	1,987	1,32	1,712
	Out	0,987	1,986	0,857	1,215	1,403	1,501	1,408	1,61	0,912	1,659	1,618	1,11	1,25	1,986	1,321	1,001
2	In	1,547	2,25	1,834	2,1	1,498	1,52	1,677	2,501	1,718	1,201	1,75	1,45	1,378	1,575	2,511	2,011
	Out	1,5	2,103	1,433	1,495	1,478	1,501	1,32	1,601	1,619	1,11	1,575	1,376	1,326	1,42	1,289	1,812
3	In	0,502	2,001	1,403	2,006	2,005	2,81	0,71	0,535	1,525	2,353	1,405	1,356	1,898	2,115	2,3	1,1
	Out	0,493	1,987	1,385	1,25	2,02	2,003	1,989	0,405	1,475	2,225	0,738	1,181	1,754	2,078	2,215	1,159
4	In	0,353	1,203	1,408	0,65	2,005	1,112	0,653	2,02	0,938	1,503	1,38	1,503	1	1,49	1,523	2,87
	Out	0,328	1,192	1,405	0,638	1,982	1,003	0,638	2,011	0,989	1,5	1,38	1,503	1	1,49	1,523	2,87
5	In	0,75	1,43	1,31	1,405	0,698	1,37	0,76	1,12	1,48	1,5	0,62	2,01	2,203	2,5	1,92	1
	Out	0,61	0,62	1,31	1,42	0,69	1,395	0,768	0,91	1,43	1,49	0,618	2,025	2,18	2,004	1,91	1,02
6	In	0,853	0,862	0,892	0,103	0,853	0,672	0,712	1,078	0,802	0,762	0,538	0,425	0,868	1,14	0,858	1,24
	Out	0,511	0,625	0,639	0,983	0,678	0,603	0,638	0,918	0,734	0,603	0,421	0,392	0,739	0,988	0,822	0,989
7	In	0,798	0,982	1,52	1,48	0,651	0,658	0,601	0,92	0,758	0,952	0,638	0,635	0,511	0,495	0,698	0,839
	Out	0,504	0,638	1,04	0,983	0,633	0,532	0,582	0,678	0,539	0,903	0,552	0,546	0,452	0,591	0,521	0,545
8	In	0,612	0,778	0,812	0,922	0,636	0,753	0,598	0,75	0,83	0,621	0,601	0,658	0,638	0,638	0,839	1,24
	Out	0,513	0,523	0,628	0,758	0,462	0,501	0,438	0,521	0,628	0,492	0,48	0,473	0,511	0,495	0,698	0,858
9	In	0,843	1,002	0,989	1,283	0,723	0,71	0,752	0,728	0,52	0,545	0,752	0,652	1,48	0,78	0,79	1
	Out	0,725	0,643	0,628	0,752	0,538	0,498	0,502	0,512	0,372	0,493	0,532	0,488	0,78	0,61	0,632	0,652
10	In	0,832	1,02	1,004	1,088	1,024	0,754	0,734	0,74	0,512	0,68	0,752	0,81	0,85	0,91	0,82	0,83
	Out	0,721	0,72	0,725	0,751	0,735	0,521	0,478	0,475	0,378	0,422	0,562	0,512	0,618	0,738	0,522	0,534

*Окончание приложения Г*

Т а б л и ц а В2 – Расчет M(x) и D(x)

1 - in		2 - in		3 - in		4 - in		5 - in	
M(x)	1,58846666	M(x)	1,9014	M(x)	1,734933333	M(x)	1,44073333	M(x)	1,405067
D(x)	0,16251840	D(x)	0,168277837	D(x)	0,358424896	D(x)	0,32096408	D(x)	0,252134
1 - out		2 - out		3 - out		4 - out		5 - out	
M(x)	1,4549333	M(x)	1,5972	M(x)	1,6238	M(x)	1,43013333	M(x)	1,36
D(x)	0,13181106	D(x)	0,062422816	D(x)	0,284631064	D(x)	0,30844081	D(x)	0,330519
6 - in		7 - in		8 - in		9 - in		10 - in	
M(x)	0,84	M(x)	0,87	M(x)	0,79	M(x)	0,903	M(x)	0,89
D(x)	0,073	D(x)	0,11	D(x)	0,024	D(x)	0,043	D(x)	0,024
6 - out		7 - out		8 - out		9 - out		10 - out	
M(x)	0,75	M(x)	0,68	M(x)	0,59	M(x)	0,62	M(x)	0,62
D(x)	0,039	D(x)	0,033	D(x)	0,012	D(x)	0,014	D(x)	0,017



