

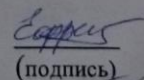
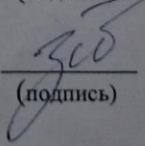
Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра «Телекоммуникационные системы»
Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой
к.т.н., профессор Байкенов А.С.
(ученая степень, звание, ФИО) (подпись)
« ____ » _____ 2015 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

на тему: Исследование факторов влияющих на скорость передачи в
волоконном световоде на участке последней мили.

Магистрант <u>Четыркин С.В.</u> (Ф.И.О.)	_____ (подпись)	группа <u>МТСП-13-1</u>
Руководитель <u>к.т.н., ст преподаватель</u> (ученая степень, звание)	_____ (подпись)	<u>Ефремова Ю.И.</u> (Ф.И.О.)
Рецензент <u>к.т.н., зав. каф. РЭТ КазНТУ</u> (ученая степень, звание)	_____ (подпись)	<u>Касимов А.О.</u> (Ф.И.О.)
Консультант по ВТ <u>к.т.н., ст..преп.</u> (ученая степень, звание)	 _____ (подпись)	<u>Ефремова Ю.И.</u> (Ф.И.О.)
Нормоконтроль <u>асистент каф. т.к.с.</u> (ученая степень, звание)	 _____ (подпись)	<u>Зайцев Е.О.</u> (Ф.И.О.)

Алматы, 2015

Содержание

Введение.....	3
1. Основные направления развития и проблемы уровня доступа.....	4
1.1 Понятие сетей доступа.....	5
1.2 Проблема «Последней мили».....	6
1.3 Классификация и краткая характеристика технологий проводного абонентского доступа.....	10
1.4 Технология FTTx.....	11
1.4.1 Технология Ethernet FTTH.....	14
2. Физические параметры волоконного световода.....	16
2.1 Оптические потери в волоконном световоде.....	16
2.2 Природа оптических потерь в световодах, собственные и избыточные оптические потери.....	17
2.1.1 Собственное ИК поглощение.....	18
2.1.2 Собственное УФ поглощение.....	19
2.1.3 Собственное рассеяние.....	19
2.1.4 Избыточное поглощение.....	20
2.1.5 Избыточное рассеяние.....	21
2.1.6 Изгибные потери.....	21
2.3 Виды потерь в оптическом кабеле.....	22
2.4 Зависимость между скоростью передачи данных и длиной оптической линии.....	26
2.5 Заключение по теоритической части.....	26
3. Исследование факторов влияющих на скорость передачи в волоконном световоде на участке последней мили.....	27
3.1 Проведения эксперимента.....	28
4. Инженерный расчет.....	
4.1 Расчёт коэффициента затухания.....	39
4.2 Расчёт хроматической дисперсии.....	41
4.3 Расчёт дисперсионных характеристик ОВ на ЭКУ.....	42
Заключение.....	44
Приложение А	
Приложение Б	

Андатпа

Бұл магистрлік диссертацияны жұмыс негізделген соңғы миля талшықты-оптикалық байланыс зерттеуге байланысты мәселелерді қарауды құрады. Қазіргі заманғы технологияларды талдау бүгін нарығында ұсынады, сондай-ақ негізгі физикалық параметрлерді беру жылдамдығын оптикалық талшық әсер . Оның жұмысының барысы мен берілетін ақпараттың сапасына әсерін бағалау оптикалық жарық нұсқаулығы қозғайтын енгізу және онымен байланысты сипаттамалары әр түрлі параметрлерін эксперименттік зерттеу.

Аннотация

В данной магистерской диссертационной работе произведено рассмотрение вопросов связанных с исследованием работы последней мили на базе волоконной оптической связи. Произведен анализ современных технологических предложений на современном рынке, а так же рассмотрены основные физические параметры влияющие в волоконном световоде на скорость передачи. Проведены экспериментальные исследования при различных параметрах входных и сопутствующих характеристик влияющих на оптический световод в процессе его работы и дана оценка влияния по качеству передаваемой информации.

Annotation

In this master's dissertation thesis reviewing of the questions connected to research of operation of the last mile on the basis of fiber optic communication is made. The analysis of the modern technological sentences in the modern market is made, and the key physical parameters influencing in the fiber lightguide transmission rate are also considered. The pilot studies in case of input different parameters are conducted and the accompanying characteristics influencing the optical light waveguide in the course of its operation and the impact assessment on quality of the transmitted data is given.

Введение

В современных условиях все страны с развитой инфраструктурой все больше переходят на волоконные оптические линии связи. Это связано с тем что наиболее высокую скорость передачи данных на рынках телекоммуникаций сейчас может обеспечить лишь стекловолокно. С расширением полосы пропускания, а также использования широкополосного доступа в сеть интернет на рынке услуг появилось огромное количество новейших технологий и предложений от компаний операторов. В свою очередь это способствует стимулированию и динамичному росту трафика, и

количеству подключенных абонентов. Только внедрение передовых технологий и переход к волоконной оптике на всех уровнях построения сети (от магистральных узлов по уровень доступа) предоставит возможность расширить спектр услуг для конечного пользователя с сохранением прибыльности проекта в целом.

Развитие волоконно-оптических линий, и внедрение их во множестве прогрессивных стран привело к повышению и ужесточению норм относительно качества надежности и эффективности в целом во всем спектре услуг оператора. Но современные производители с выпуском новейших цифровых систем и оптоволоконных кабелей с каждым годом усовершенствуют методы производства тем самым поднимая на новый уровень их совместное применения и улучшения параметров оборудования.

Наиболее перспективное направление по модернизации существующих сетей доступа это решение на базе технологии активных оптических сетей FTTH Ethernet (Fiber-To-The-Home основанных по архитектуре Ethernet Point to Point (P2P)). Эта технология позволяет по-новому взглянуть на построение сетей с учетом уже имеющегося оборудования и топологии. Здесь на смену медным кабелям используемых на участке последней мили приходят кабеля использующие стекловолоконные жили. Построение сети на активном оптическом оборудовании обеспечивает практически неограниченную полосу пропускания что в дальнейшем позволит достичь максимальной гибкости при развертывании новейших сервисов с высокой потребностью. В пропускной способности.

Целью работы исследование факторов влияющих на скорость передачи в волоконном световоде на участке последней мили. Для достижения цели необходимо:

- провести обзор «Последней мили»-функции, построение, проблемы;
- провести обзор современных технологий и параметров сети;
- произвести эксперимент по тестированию последней мили с учетом описанного материала основываясь на качестве работы сети;
- произвести расчет оптических параметров оптоволоконного кабеля.

1. Основные направления развития и проблемы уровня доступа

Последняя миля – это оптоволоконная или медная линия (для фиксированных сетей связи), соединяющий оконечное оборудование с узлом доступа провайдера, или через выносной модуль (концентратор, мультиплексор) В данных системах предпочтение отдается оборудованию и услугам с удобной установкой и низкой себестоимостью.

На современном этапе широко распространено подключение абонентов к каналам связи с применением технологии семейства xDSL осуществляемое с помощью телекоммуникационных сетей общего пользования, которые

охватывают все населённые пункты. Провайдеры активно используют эти сети, так как они имеют малую стоимость при подключении абонента. Большой недостаток таких сетей – это ограниченная скорость передачи данных, которая на данный момент составляет до 54 Мбит/с

1.1 Понятие сетей доступа

Одной из самых проблемных и динамично развивающихся частей современных сетей связи является доступ пользователей к узлам связи транспортных сетей для предоставления телекоммуникационных услуг. При этом наблюдаются следующие тенденции развития доступа:

-использование существующей инфраструктуры основанных на медных линиях связи с предоставлением доступа одновременно как к узкополосным так и широкополосным услугам посредством модемов цифровых абонентских линий по технологии xDSL в разновидностях симметричных, ассиметричных и высокоскоростных линий (HDSL, ADSL, VDSL), в которых сигналы передаются на скоростях 64 кбит/с -50 Мбит/с на относительно небольшое расстояние;

-использование технологий «волокно в дом», «волокно в здание» и т.д. обозначаемых общим семейством технологий FTТх, например, активной оптической сет FTТН Ethernet основанных на сети волоконных линий передачи данных с доступом к услуга любого типа;

-использование технологий радиодоступа RLL (Radio Local Loop) для фиксированого или мобильного широкополосного доступа с разделением радиочастотного спектра, по времени, кодовым разделением или пакетной передачи. Представителем последнего является наиболее распространенная технология WiMAX.

Плоскость услуг отражается во всех известных и востребованных услугах электросвязи к которым можно отнести:

- а) IP-телефонию;
- б) видеосвязь;
- в) интернет;
- г) звуковое вещание;
- д) цифровое телевидение.

Для реализации всех услуг необходимы различные терминалы. К ним можно отнести обычные телефонные аппараты, теле и радио приемники, терминалы сетевых подключений цифровых сетей с интеграцией услуг и служб (ISDN), персональные компьютеры, ноутбуки и т.д.

В связи с развитием телекоммуникационных сетей и их качественным преобразованием, а в частности можно отметить создание мультисервисных сетей, происходит внедрение современных технологий на участке последней мили. Совершенно новые подходы к их построению приводят к тому что само понятие абонентская линия уже не отражает всей сути элемента. Поэтому

международными стандартами а так же рекомендациями был введен термин Access Network-Сеть доступа.

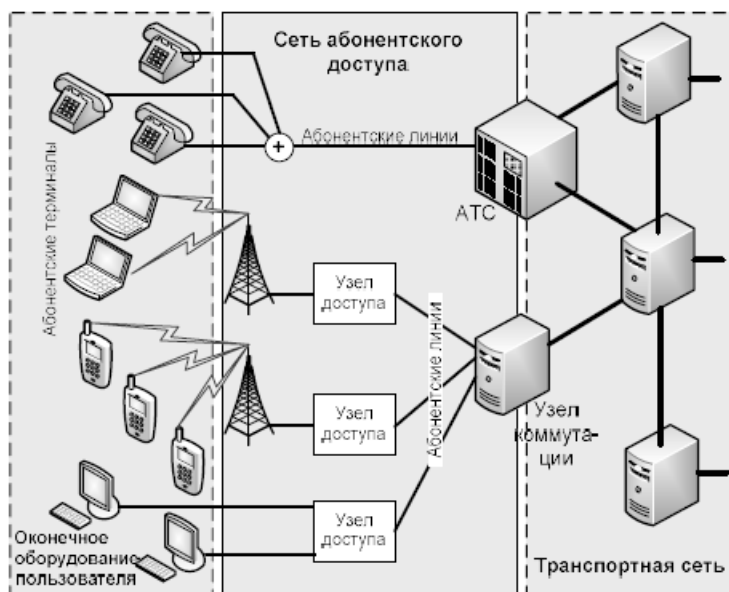


Рисунок 1.1 - Типовая структура и состав сети

Типовая структура состоит в простейшем случае включает в себя 3 основных элемента (которые можно проследить из рисунка 1.1):

- абонентского терминала;
- абонентской линии;
- узел коммутации.

Структурно сеть доступа располагается между оборудованием, пользователя и транспортной или магистральной сетью. Границей в сетях доступа может выступать коробка или розетка к которой подключается терминал пользователя. Граница между сетью доступа и транспортной или магистральной сетью проходит в месте установки коммутационного оборудования, в пользовательские комплекты которого входят подключаемые линии пользователей. Такая модель основанная на совершенно новых подходах при построение состоит из двух узловых элементов. Первый представляет собой совокупность подсетей линий пользователя, а второй образует подсеть доступа (базовая сеть, распределительная сеть)[8].

1.2 Проблема «Последней мили»

Проблему абонентского доступа к услугам телекоммуникационной сети на участке «абонентский терминал – узел доступа» с тем же качеством что и непосредственно в телекоммуникационной сети, принято называть проблемой «последней мили».

Сети доступа с каждым годом перестают обеспечивать растущие потребности пользователей. Такая потребность пользователей вызвана тем

что на современном этапе развития интернет занимает ключевое значение в области множества сфер деятельности. Что вызвало огромный прорыв и почти полный отказ от систем электросвязи посредством помещения их в один «поток». Изменения коснулись также множества приложений (Software) в продуктах которых посредством интернета можно выполнять определенные функции (от заказа еды до управления дата центрами) не выходя из дома. Прогресс влияет все больше на объемы передаваемой информации что в свою очередь вызывает огромные нагрузки и порой нехватки полосы пропускания для комфортной работы. Именно поэтому множество стран на настоящее время считают наиболее приоритетным направлением развития именно сетей доступа.

Еще одной из немаловажных проблем последней мили является финансовая сторона. Данная проблема основывается на потребностях пользователя «высокая скорость за меньшие деньги». Поэтому современные провайдеры для популяризации интернета стараются при планировании сети построить таким образом, чтобы она требовала наименьших затрат на данном участке за которые пользователю в дальнейшем нужно будет платить. Этот фактор является «тормозом» для технологий в данном сегменте.

1.2.1 Направления в решении проблем «Последней мили»

Выделяют три направления удовлетворения новых информационных потребностей пользователей за счет развития технологий абонентского доступа

- увеличение скорости передачи и предоставление новых услуг тем абонентам, которые уже имели доступ к сети, и в тех точках доступа, которые уже существовали ранее;

- подключение новых абонентов в тех местах, где прежде не было точек подключения, с предоставлением полного набора современных услуг;

- подключение подвижных абонентов и предоставление им сервисов, соизмеримых по качеству с услугами, которые предоставляются фиксированным абонентам.

Если первые два направления не исключают «персональную мобильность абонентов», перемещающихся между фиксированными точками доступа (подключения), то третье направление призвано обеспечить «мобильность терминалов». В целом же от сети абонентского доступа требуется гарантировать персональный доступ к любым информационным и телекоммуникационным услугам любым абонентам - независимо от их местонахождения, то есть обеспечить персональную глобальную связь по принципу «всегда и везде».

В настоящее время наметились четыре наиболее характерных пути решения проблемы «последней мили»:

- строительство волоконно-оптических линий связи на абонентском участке. Строительство волоконно-оптических линий связи на участке

«последней мили» имеет ряд очевидных достоинств и соответствует перспективным концепциям. Стоимость оптического кабеля неуклонно снижается, причем оптические абонентских линий служат достаточно долго и не требуют особого внимания. Однако для прокладки кабеля необходимы трудовые и временные затраты специально подготовленных работников, а также недешевое оконечное оборудование приема/передачи и мультиплексирования, что увеличивает стоимость абонентских линий.

-прокладка медно-кабельных абонентских линий. Это традиционное решение имеет ряд положительных моментов: простое проектирование, наличие опытного персонала по строительству и эксплуатации, приемлемая стоимость. Основные недостатки: дорогое обслуживание и ограниченная - по сравнению с ВОЛС - пропускная способность при тех же трудовых и временных затратах на строительные работы. В последнее время отмечается еще один «специфический» недостаток - привлекательность медных кабелей для сборщиков металлолома.

-уплотнение существующих (медно-кабельных) абонентских линий. Идея уплотнения абонентских линий родилась давно. Аналоговое оборудование высокочастотного уплотнения широко используется в телекоммуникационных сетях до сих пор. Однако своим подлинным развитием данное решение обязано появлению цифровых абонентских линий (DSL - Digital Subscriber Loop или Line). Технологии xDSL (где x является обобщенным символом различных аббревиатур, соответствующих различным вариантам DSL) позволили организовать высокоскоростную цифровую передачу по существующим абонентских линий.

Технологии DSL открыли новые возможности для предоставления коммуникационных услуг, так как полоса пропускания абонентского шлейфа теперь не ограничивается 4 кГц, как это было в традиционной аналоговой телефонии. Расширить полосу пропускания оказалось реальным с помощью специальных линейных кодов и техники цифровых сигнальных процессоров. Технологии DSL используют различные схемы линейного кодирования: CAP, 2B1Q, PAM и др. Линейное кодирование - это алгоритм преобразования сигнала, предназначенный для надежной помехоустойчивости передачи данных по медному проводу. Например, новая технология линейного кодирования Trellis Coded - PAM (TC-PAM), лежащая в основе нового перспективного стандарта SHDSL, уменьшает мощность сигнала, увеличивает дальность передачи и позволяет кодировать больше данных внутри частотного спектра [1].

Допустимая длина цифровых абонентских линий, как правило, составляет не более 5-6 км (в случае диаметра жилы кабеля 0,4-0,5 мм). Используя регенераторы, несложно увеличить допустимую длину цифровых абонентских линий. «Допустимой» обычно считается длина, при которой вероятность ошибки на бит не превышает 10^{-7} . Существуют и более строгие международные и российские ведомственные нормативы, разработанные для цифровых первичных сетей, которые часто применяют для оценки

пригодности цифровых абонентских линий.

Дополнительным резервом построения САД на базе существующих проводных «абонентских линий» служат [1]:

- проводная разводка радиоточек;
- линии электропередач (например, известны технологии X.10 и DPL - Digital Power line, которая позволяет передавать данные по электропроводке со скоростью до 1 Мбит/с и др.);
- сети кабельного телевидения (во многих городах уже применяются для доступа в Интернет);
- использование технологий беспроводного абонентского доступа. В последнее время значительно возрос интерес к технологиям беспроводного абонентского доступа, именуемым WLL-технологиями (Wireless Local Loop). Более распространенные технологии радиодоступа (в отличие от технологий оптического беспроводного доступа) сокращенно называют RLL (Radio Local Loop) [24].

Технологии беспроводного абонентского доступа имеют бесспорное преимущество перед проводными решениями [3]:

- применение в местах отсутствия кабельной инфраструктуры, а также в труднодоступных и малонаселенных районах;
- быстрое развертывание и ввод в эксплуатацию;
- организация доступа в любом месте (в пределах зон покрытия);
- поддержание связи при движении абонентов.

Главные недостатки WLL - ограниченная пропускная способность и относительно высокая стоимость в расчете на одного абонента, а также традиционные для радиосвязи проблемы «открытости» к внешним воздействиям.

В настоящее время существует огромное множество WLL-технологий, которые условно разделяются на две большие группы [2]:

- фиксированной связи;
- подвижной связи.

Традиционно аббревиатуру WLL применяют в узком смысле для обозначения первой группы технологий - фиксированного беспроводного абонентского доступа. Технологии же подвижной, или иначе мобильной, связи

обычно рассматривают как самостоятельную группу технологий, среди которых принято различать технологии сотовой, транкинговой, пейджинговой и спутниковой связи. Очевидно, что подвижную связь всегда можно использовать как фиксированную. Обратное же не всегда приемлемо. С другой стороны, фиксированная связь позволяет обеспечить предоставление широкополосных услуг с качеством, соизмеримым с качеством услуг, предоставляемых проводными технологиями, что пока не в состоянии позволить себе подвижная связь.

1.3 Классификация и краткая характеристика технологий проводного абонентского доступа

В соответствии с работой [1, 7] технологии проводного абонентского доступа можно разбить на пять основных групп по критерию среды передачи и категориям пользователей.

-LAN (Local Area Network) - технологии предоставления корпоративным пользователям услуг доступа к ресурсам локальных вычислительных сетей и использующих в качестве среды передачи структурированные кабельные системы категорий 3, 4 и 5, коаксиальный кабель и оптоволоконный кабель;

-DSL (Digital Subscriber Line) - технологии предоставления пользователям ТфОП услуг мультимедиа и использующих в качестве среды передачи существующую инфраструктуру ТфОП;

-кабельное телевидение (КТВ) - технологии предоставления пользователям сетей КТВ мультимедийных услуг (за счет организации обратного канала) и использующих в качестве среды передачи оптоволоконный и коаксиальный кабели;

-Optical Access Networks (OAN) - технологии предоставления пользователям широкополосных услуг, линии доступа к мультимедийным услугам и использующих в качестве среды передачи оптоволоконный кабель. На рисунке 1.2 можно проследить классификацию технологий при проектировании сети;

-сети коллективного доступа (СКД) - гибридные технологии для организации сетей доступа в многоквартирных домах; в качестве среды передачи используется существующая в домах инфраструктура ТфОП, радиотрансляционных сетей и сетей электропитания.



Рисунок 1.2 – Классификация технологий семейства OAN

1.4 Технология FTTx

Группа технологий FTTx (Fiber To The x - оптическое волокно до ...) предназначена для совместного использования с технологиями ADSL и VDSL и позволяет более эффективно использовать пропускную способность этих технологий благодаря сокращению длины медно-кабельных линий связи [9]. Есть несколько вариантов реализации FTTx, из них можно выделить основные:

FTTN - Fiber To The Home (доведение волокна до квартиры);

FTTB - Fiber To The Building (доведение волокна до здания).

Варианты, по сути, дублирующие FTTN и FTTB с небольшими изменениями:

FTTN (Fiber to the Node) - волокно до сетевого узла;

FTTO - Fiber To The Office (доведение волокна до офиса);

FTTC - Fiber To The Curb (доведение волокна до кабельного шкафа);

FTTCab - Fiber To The Cabinet (аналог FTTC);

FTTR - Fiber To The Remote (доведение волокна до удаленного модуля, концентратора);

FTTOpt - Fiber To The Optimum (доведение волокна до оптимального пункта);

FTTP - Fiber To The Premises (доведение волокна до точки присутствия клиента).

Отдельно нужно отметить концепцию FITB (Fiber In The Building) - организация распределительной сети внутри здания. Выше указанные технологии отличаются главным образом тем, на сколько близко к пользовательскому терминалу подходит оптический кабель.

На данный момент интенсивно растет интерес к развертыванию оптических сетей доступа с прокладкой кабеля до здания (FTTB), а также непосредственно до абонента (FTTH). В большей степени, такая ситуация объяс-

няется постоянным ростом требований к пропускной способности каналов связи, поскольку сейчас наблюдается бум развития «тяжелых» интернет-приложений, включая онлайн-видео, онлайн-игры и прочие сервисы.

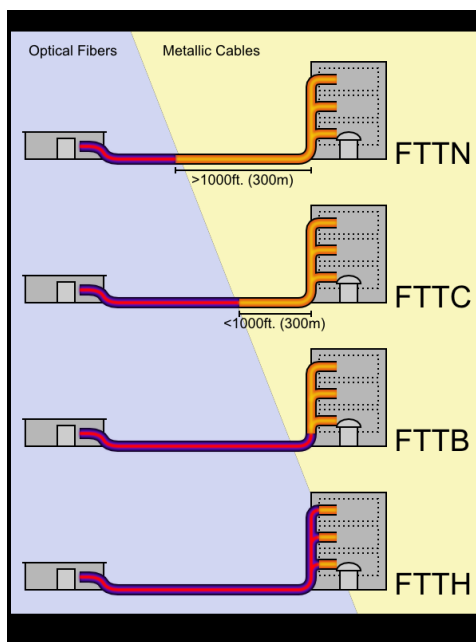


Рисунок 1.3 - Схема иллюстрирующая различия архитектур FTТх

Однозначно в пользу решений FTТх выступают эксперты некоторых компаний-производителей, которые сравнивают продолжительность жизненного цикла инвестиций в любую технологию доступа и коррелированный рост требований к полосе пропускания каналов доступа. По мере стремления пользователей к получению услуг все более высокого класса, оператор может оказаться уязвимым перед лицом конкурентов, не заложив определенный «запас прочности» в свою сеть. Проведенный анализ показывает, что если технические решения, которые закладываются в основу сегмента доступа сети сегодня, окажутся неспособными обеспечить скорость 100 Мбит/с в 2013-2015 годах, то моральное устаревание оборудования произойдет до окончания инвестиционного цикла.

-FTТН обеспечивает наибольшую полосу пропускания и стабильность работы;

-это полностью стандартизованный и наиболее перспективный вариант развития сетей широкополосного доступа;

-технология обеспечивает массовое обслуживание абонентов на расстоянии до 20 км от узла связи;

-существенно сокращаются эксплуатационные расходы за счет уменьшения площади технических помещений, снижения;

-энергопотребления, и количества станций для регенерации и усиления сигнала по сравнению с медным кабелем;

-существует два часто применяемых типа организации FTТН сетей: на базе технологии Ethernet и на базе технологии PON.

Если же говорить о сегодняшних реалиях, архитектура FTTB преобладает в новостройках и у крупных операторов связи, тогда как FTTH востребована в новом малоэтажном строительстве (например, в коттеджных городках в окрестностях крупных городов).

Рассмотрим особенности реализации и применении наиболее распространенных технологий.

Технология FTTH используется в основном как бюджетное и быстро внедряемое решение там, где существует распределительная «медная» инфраструктура и прокладка оптики нерентабельна. Всем известны связанные с этим решением трудности: невысокое качество предоставляемых услуг, обусловленное специфическими проблемами лежащих в канализации медных кабелей, существенное ограничение по скорости и количеству подключений в одном кабеле.

Технология FTTC - это улучшенный вариант FTTH, лишенный части его недостатков. Архитектура FTTC в первую очередь предназначена для операторов, уже использующих технологии xDSL или PON, и операторов кабельного телевидения. Реализация архитектуры FTTC позволит им с меньшими затратами увеличить и число обслуживаемых пользователей, а также выделяемую каждому из них полосу пропускания. В России этот тип подключения часто применяется небольшими операторами Ethernet-сетей. Связано это с более низкой стоимостью медных решений и с тем, что монтаж оптического кабеля требует высокой квалификации исполнителя.

Технология FTTB предполагает доведение волокна до здания, и получила наибольшее распространение, так как при строительстве сетей FTTx на базе Ethernet - это, зачастую, единственная технически возможная схема построения сети. Кроме того, в структуре затрат на создание Ethernet-сети разница между вариантами FTTC и FTTB относительно небольшая. Также не следует забывать, что операционные расходы при эксплуатации сети FTTB ниже, а пропускная способность выше.

Технология FTTH является наиболее затратной, но в то же время и наиболее перспективной, среди всех типов доступа FTTx. FTTH подразумевает доведение оптического волокна до квартиры или частного дома пользователя. В этом случае оптическое волокно заводится в дом, как правило, на цокольный этаж или на чердак (что более экономически целесообразно) и подключается к устройству ONU (Optical Network Unit). На стороне оператора связи устанавливается терминал оптической линии OLT (Optical Line Terminal). OLT является primary устройством и определяет параметры обмена трафика (например, интервалы времени приема/передачи сигнала) с абонентскими устройствами ONU (или ONT, в случае FTTH). Дальнейшее распределение сети по дому происходит по «витой паре»

На первый взгляд, строительство сети FTTH - это очень трудоемкий и дорогостоящий процесс, но опыт подсказывает, что основные затраты при развертывании сети FTTH приходятся на строительные работы, а стоимость

самого оптоволоконного кабеля составляет относительно небольшую часть. Это означает, что в случае необходимости проведения строительных работ количество прокладываемого оптоволоконного кабеля уже не имеет большого значения.[13]

Более того, хотя жизненный цикл сети FTTH и ее электронных компонентов составляет несколько лет, оптоволоконный кабель и оптическая распределительная сеть имеют более длительный срок службы (по крайней мере, 30 лет).

Архитектуры развернутых сетей FTTH можно разделить на три основные категории:

- а) «Кольцо» Ethernet-коммутаторов;
- б) «Звезда» Ethernet-коммутаторов;
- в) «Дерево» с использованием технологий пассивной оптической сети PON.

1.4.1 Технология Ethernet FTTH

В решении Ethernet FTTH для коммутации линий подразумевается использование коммутаторов с оптическими портами или оптическими трансиверами.

В основе первых европейских проектов сетей Ethernet FTTH лежала архитектура, при которой коммутаторы, расположенные на цокольных этажах многоквартирных домов, были объединены в кольцо по технологии Gigabit Ethernet. Кольцевая структура обеспечивала прекрасную устойчивость к различного рода повреждениям кабеля и была весьма рентабельной, но к ее недостаткам можно было отнести разделение полосы пропускания внутри каждого кольца доступа (1 Гбит/с), что давало в перспективе сравнительно небольшую пропускную способность, а также вызывало трудности масштабирования архитектуры [9].

Затем широкое распространение получила архитектура Ethernet типа «звезда» (рисунок 1.4). Такая архитектура предполагает наличие выделенных оптоволоконных линий (обычно одномодовых, одноволоконных линий с передачей данных Ethernet по технологии 100BX или 1000BX) от каждого оконечного устройства к точке присутствия (point of presence, POP), где происходит их подключение к коммутатору. К портам коммутатора подключаются устройства конечных пользователей. Такой подход обеспечивает высокий уровень надежности за счет возможности резервирования оптических каналов, и обеспечивает преимущество с существующей «медной» инфраструктурой [13].

Рассмотрим преимущества решений Ethernet FTTH перед архитектурой на базе PON .

Практически неограниченная дискретная полоса пропускания. Оптоволоконная линия может обеспечить практически неограниченную

полосу пропускания, что позволяет достичь максимальной гибкости в наращивании предоставляемых сервисов в будущем, когда потребность в пропускной способности возрастет. Архитектура Ethernet FTTH позволяет провайдеру гарантировать каждому абоненту необходимую пропускную способность и создавать в сети индивидуальные профили полосы пропускания для каждого клиента.

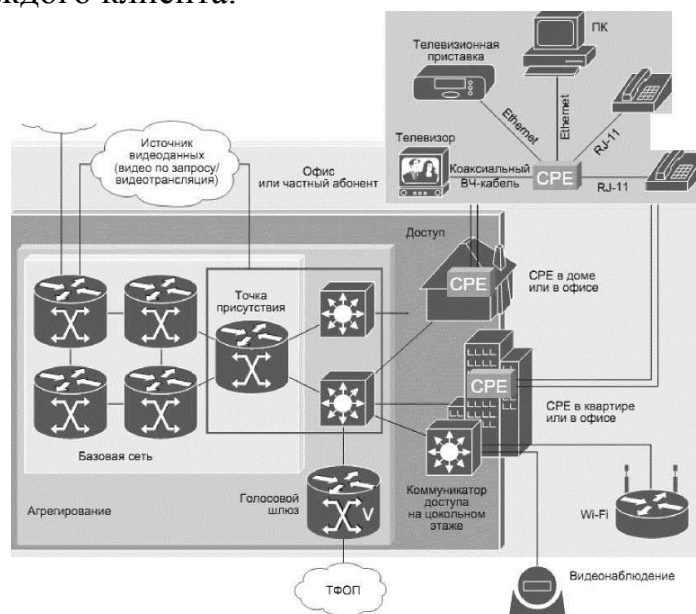


Рисунок 1.4 - Архитектура сети Ethernet FTTH типа «звезда»

Большой радиус действия. В типовых конфигурациях сетей доступа Ethernet FTTH применяются недорогие одноволоконные линии, использующие технологию 100BX или 1000BX, с заданным максимальным радиусом действия 10 км. Для работы на больших расстояниях имеются оптические модули, позволяющие увеличить мощность оптического сигнала, а также оптоволоконные пары с оптическими модулями, которые можно подключить к порту любого Ethernet-оборудования.

Гибкое масштабирование сети. В случае появления новых абонентов можно добавить дополнительные карты Ethernet с высокой степенью модульности. Напротив, при использовании архитектуры на базе PON подключение первого абонента к оптическому дереву требует наличия наиболее дорогостоящего порта OLT, а при добавлении абонентов к тому же дереву PON стоимость подключения каждого абонента только увеличивается за счет приобретения ONT.

Гибкое масштабирование скорости обслуживания абонентов. Поскольку одномодовые оптоволоконные линии не зависят от используемой технологии и скорости передачи данных, можно легко увеличить скорость для одного абонента, не влияя на работу других. Это означает, что абонент, использующий технологию Fast Ethernet, может перейти на Gigabit Ethernet за счет переключения оптоволоконной линии абонента на другой порт коммутатора и замены только Ethernet-устройства абонента.

Безопасность обеспечивается за счет того, что выделенная оптоволоконная линия является защищенной средой на физическом уровне. Кроме того, коммутаторы Ethernet, использующиеся у провайдеров, призваны обеспечить разделение физического уровня портов и логического уровня абонентов и имеют функции защиты, которые в состоянии предотвратить попытки вторжений.[9]

2. Физические параметры волоконного световода.

2.1 Оптические потери в волоконном световоде

Волоконный световод представляет собой диэлектрический цилиндрический волновод, как правило, выполненный из стекла и имеющий внешнее защитное полимерное покрытие. В световоде существуют две области, различающиеся составом - сердцевина (диаметр около 8 мкм для телекоммуникационных световодов) и окружающая ее оболочка (диаметр около 125 мкм для телекоммуникационных световодов). Сердцевина имеет более высокий показатель преломления по сравнению с оболочкой, что позволяет излучению распространяться по ней за счет эффекта полного внутреннего отражения на границе сердцевина-оболочка. Малый внешний диаметр телекоммуникационного световода позволяет изгибать его вплоть до радиусов порядка 1 см без разрушения, что позволяет укладывать волоконные кабели практически по любому требуемому маршруту.

Одним из важнейших параметров световода являются оптические потери в нем, определяющие максимальное расстояние, на которое может быть передан оптический сигнал по световоду. Как известно, при распространении пучка излучения умеренной интенсивности в однородной среде изменение его мощности с расстоянием описывается законом Бугера-Ламберта с характерным параметром α , называемым коэффициентом затухания и численно определяющим оптические потери в среде:

$$P = P_0 \times \exp(-\alpha x), \quad (2.1)$$

где P_0 - мощность пучка в некоторой точке, а P - его мощность на расстоянии x от нее.

Поскольку в световоде в общем случае может распространяться несколько мод излучения, изменение мощности излучения при распространении по световоду дается суммой подобных выражений для каждой моды:

$$P = \sum P_i \times \exp(-\alpha_i x), \quad (2.2)$$

где P_i - мощность излучения в i -той моде световода в точке его возбуждения (на торце световода), a_i - коэффициент затухания для i -той моды, а P - мощность излучения в световоде на расстоянии x от точки возбуждения.

Моды имеют различные распределения поля, и поэтому оптические потери будут для них разными, так как доля мощности, распространяющаяся по сердцевине и по оболочке (которые отличаются составом стекла, и, соответственно, оптическими потерями в нем), будет разной для каждой моды (сдвиг Гооса-Генхена). Получившееся уравнение (2.2) достаточно сложно, поскольку коэффициент P_i при каждом его члене зависит от характера возбуждения световода, а определение оптических потерь a_i для каждой моды в отдельности не всегда возможно. Однако, существуют частные, но наиболее распространенные случаи, когда уравнение может быть представлено в простой форме:

а) Одномодовый режим. Световод обладает единственной направляемой модой (для данной длины волны). Очевидно, в этом случае будет справедливо уравнение (2.1).

б) Многомодовый режим в случае слабого поглощения и больших длин. Параметры реального световода (форма и размер сердцевины, ее показатель преломления) всегда испытывают вариации вдоль его длины, кроме того, световод имеет изгибы и микроизгибы. Все эти факторы приводят к связи между модами и перекачке энергии между ними. Таким образом, уравнение (2.2) требуется усложнить. Однако, если характерная длина перекачки много меньше характерной длины затухания и используемой длины световода, то в световоде устанавливается равномерное распределение мощности по всем направляемым модам. Затухание излучения в этом случае также описывается уравнением (2.1), но в этом случае значение коэффициента затухания будет величиной, усредненной по всем направляемым модам.

2.2 Природа оптических потерь в световодах, собственные и избыточные оптические потери

Волоконные световоды, применяющиеся в телекоммуникационных линиях связи, изготавливаются из кварцевого стекла, причем сердцевина легируется добавками, повышающими показатель преломления. Наиболее широко используемой добавкой является диоксид германия. Добавка диоксида германия увеличивает показатель преломления кварцевого стекла в видимой и ближней ИК области на величину:

$$\Delta n = 1.443 \times 10^{-3} C, \quad (2.3)$$

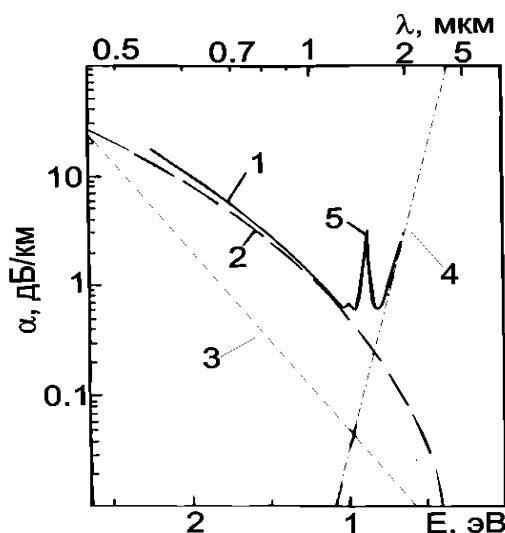
где C - концентрация GeO_2 в мол. %.

Часто пользуются величиной A - относительной разницей показателей преломления сердцевины и оболочки:

$$\Delta = \Delta n/n, \quad (2.4)$$

где n - показатель преломления оболочки.

Оптические потери в световодах обусловлены поглощением и рассеянием распространяющегося по ним излучения. В свою очередь они могут быть разделены на собственные, определяемые фундаментальными механизмами, и избыточные, обусловленные несовершенством технологии изготовления световодов. Фундаментальные потери являются тем минимальным уровнем, к которому стремятся при совершенствовании процесса производства волоконных световодов. Характерный спектр потерь кварцевого стекла представлен на рисунке 2.1. Видно, что минимум оптических потерь достигается в области 1,55 и 1,31 мкм, которые соответствуют первому и второму окнам прозрачности телекоммуникационных линий связи. Далее мы рассмотрим более подробно вклад различных механизмов потерь в полные оптические потери.



1 - оптические потери в световодах (11% GeO_2); 2 - потери, обусловленные рэлеевским рассеянием; 3 - край зонного поглощения; 4 - край фонового поглощения; 5 - поглощением ОН-групп.

Рисунок 2.1 - Разложение оптических потерь в волоконных световодах на компоненты:

2.1.1 Собственное ИК поглощение

Возбуждение колебаний атомов в сетке кварцевого стекла обуславливает ИК-край поглощения (Рисунок 2.1). Максимумы полос поглощения, связанных с колебаниями Si-O, лежат в области 9-21 мкм. Край многофонового поглощения SiO_2 в ближнем ИК-диапазоне описывается эмпирической формулой:

$$\alpha_{ir} = 3,4 \times 10^{11} \exp(-38,9E) \text{ [дБ/км]}$$

(2.5)

где E - энергия в эВ

Край полного поглощения GeO_2 сдвинут по сравнению с SiO_2 в сторону больших длин волн примерно на 700 см^{-1} . Поэтому, если световод имеет сердцевину из стекла состава $x\text{GeO}_2 - (1-x)\text{SiO}_2$, его край ИК-поглощения также сдвигается в длинноволновую сторону:

$$\alpha_{ir} = (3,4 - 3,3x) \times 10^{11} \exp\{-38,9E\} \text{ [дБ/км]} \quad (2.6)$$

Это поглощение дает существенный (более 1 дБ/км) вклад в общие потери ВС только в области длин волн более 1.85 мкм и в телекоммуникационных окнах прозрачности оно несущественно.

2.1.2 Собственное УФ поглощение

Длинноволновое поглощение во многих диэлектриках вдали от максимума описывается экспоненциальной зависимостью коэффициента поглощения от энергии фотонов или эмпирическим законом Урбаха. Он справедлив как для края фундаментального электронного поглощения, так и

$$\varepsilon_{uv} = \varepsilon_0 \exp(E/E_0),$$

(2.7)

где $\varepsilon_0 = 1.474 \times 10^{-7}$ дБ/км/ВЕС.% Ge, $E_0 = 0,268$ эВ.

Отсюда можно получить выражение для хвоста УФ поглощения в германосиликатном стекле: для поглощения на примесях и точечных дефектах. Экстраполяция коэффициента экстинкции имеет вид:

$$\alpha_{uv} = \{1,07C / (44,6C + 6000)\} \exp(4,63/\lambda) \text{ [дБ/км]}, \quad (2.8)$$

где λ - длина волны в мкм, C - концентрация GeO_2 в мол. %.

Вклад этого механизма в полные оптические потери в области первого и второго окон прозрачности мал.

2.1.3 Собственное рассеяние

Статистические флуктуации плотности и состава с размерами, много меньшими длины волны, "вмораживаются" в стекло при остывании расплава в виде неоднородности показателя преломления и являются причиной рэлеевского рассеяния в световодах. Принято считать, что стекло (исходно вязкая жидкость) замораживается в состоянии, соответствующем фиктивной температуре (T_f), называемой еще температурой стеклования. Таким образом, рэлеевское рассеяние является собственным, присущим данному веществу. По

величине оптические потери этого типа доминируют в видимой и ближней ИК области спектра (рисунок 1). В телекоммуникационных окнах прозрачности рэлеевское рассеяние является основным фундаментальным механизмом потерь, и, таким образом, определяет минимальные оптические потери в волоконных световодах.

Коэффициент рэлеевского рассеяния в однокомпонентном стекле дается формулой:

$$\alpha_{s,p} = (8\pi^3/3\lambda^4)(n^2-1)^2\beta kT_f, \quad (2.9)$$

где n - показатель преломления, β - изотермическая сжимаемость при фиктивной температуре T_f .

В многокомпонентных стеклах к флуктуациям плотности добавляются также флуктуации состава. Для бинарного стекла $x\text{GeO}_2 - (1-x)\text{SiO}_2$ имеет место соотношение:

$$\alpha_{sc} = 3,3x(1-x)/\lambda^4 \text{ [дБ/км]}, \quad (2.10)$$

где длина волны λ выражена в [мкм].

При малых концентрациях это уравнение дает возрастание потерь на 0,033 дБ/км на каждый молярный процент GeO_2 при $\lambda = 1$ мкм без учета влияния диоксида германия на рассеяние за счет флуктуаций плотности.

Суммарные потери на рэлеевское рассеяние в волоконных световодах из германосиликатного стекла обычно принято выражать в виде

$$\alpha_R = A/\lambda^4 = A_0(1+z\Delta)/\lambda^4 \text{ [дБ/км]}, \quad (2.11)$$

где A_0 - коэффициент рэлеевского рассеяния в чистом SiO_2 , z - коэффициент, отражающий влияние легирующей добавки GeO_2 , а длина волны λ выражена в [мкм]. По разным данным, A_0 находится в диапазоне 0,63 - 0,75, а z - от 44 до 80.

При небольших концентрациях диоксида германия можно пренебречь его влиянием на флуктуации плотности и считать потери на рэлеевское рассеяние суммой потерь, обусловленных флуктуациями состава, и потерь, обусловленных флуктуациями плотности чистого кварцевого стекла, и принять $A \ll 0,7$.

На сегодняшний день благодаря совершенствованию технологии получен минимальный уровень оптических потерь в световодах из кварцевого стекла, предсказываемый теорией.

2.1.4 Избыточное поглощение

Поглощение различными посторонними примесями, присутствие которых в стекле обусловлено недостаточной степенью очистки исходных компонентов и загрязнениями, вносимыми во время его изготовления,

называется избыточным. Современные методы производства световодов (с использованием осаждения из парогазовой фазы) позволяют практически полностью избавиться от поглощения такими примесями, за исключением поглощения ОН-группами.

Основная деформационная колебательная полоса поглощения ОН-групп в кварцевом стекле расположена вблизи 2,73 мкм, а обертоны этого колебания и его комбинации с колебаниями сетки стекла соответствуют пикам поглощения на 1,318, 1,24, 0,95, 0,72 мкм. ОН-группы трудноустранимы, и пик

в области 1,4 мкм, как правило, наблюдается в спектрах потерь световодов (0,55 дБ/км соответствует 10-6 вес.% ОН). Этот пик обуславливает существование двух окон прозрачности кварцевого стекла на 1,31 и 1,55 мкм, разделяя их. В тоже время в окнах прозрачности поглощение ОН-группами несущественно при их концентрациях не более 10-5 вес.%.

2.1.5 Избыточное рассеяние

Оптические неоднородности, обусловленные недостатками технологии изготовления (вариацией геометрических параметров световода по длине, пузырьками газа и т.д.), а также разделением фаз в стекле, приводят к избыточному рассеянию. Если размеры этих неоднородностей меньше длины волны излучения, то они дают дополнительный вклад в рэлеевское рассеяние. В случае более крупных возмущений рассеяние имеет более слабую спектральную зависимость, например $1/\lambda$ (рассеяние Ми), или вообще не зависит от длины волны.

Этот механизм избыточных потерь является, по-видимому, доминирующим, особенно в случае для световодов с большим содержанием легирующей добавки в сердцевине. Сильное различие вязкости сердцевины и оболочки ведет к нарушению формы границы их раздела при изготовлении, а также значительно увеличивается тенденция к разделению фаз в сердцевине, ведущему к образованию крупных оптических неоднородностей в ней.

2.1.6 Изгибные потери

Изгибы световода и его микроизгибы, являющиеся следствием несовершенства технологии изготовления, также ведут к избыточным потерям. Строгий анализ этого типа потерь достаточно сложен, однако качественно его можно объяснить следующим образом. При распространении света по дуге часть поля моды, расположенная вдали от сердцевины, проходит большее расстояние, чем излучение, распространяющиеся по сердцевине. Так как поле моды обращается в ноль в поперечном направлении только на бесконечности, то на достаточно большом расстоянии от сердцевины излучение должно двигаться со скоростью, большей, чем скорость света, чтобы "догнать" излучение, идущее по сердцевине. Поскольку это

невозможно, часть излучения будет "отрываться" от моды, идущей по дуге, и высвечиваться. Когда значительная часть поля моды сосредоточена в сердцевине и радиус изгиба волокна достаточно велик, этот эффект пренебрежимо мал, что обычно и реализуется на практике. Однако когда значительная доля мощности направляемой моды распространяется вне сердцевины, или изгибы достаточно круты, эти потери начинают играть основную роль. Величина изгибных потерь растет при увеличении длины волны излучения [12].

2.2 Виды потерь в оптическом кабеле.

Первыми были созданы волокна с так называемым ступенчатым показателем преломления. Световод состоит из двух частей - ядра (центральной части, оптической среды с определенным показателем преломления, n_1) и демпфера (оптической среды с несколько меньшим показателем преломления, n_2). За счет разницы в показателях преломления реализуется явление полного внутреннего отражения, что и позволяет передавать сигналы по оптическому волокну на большие расстояния.

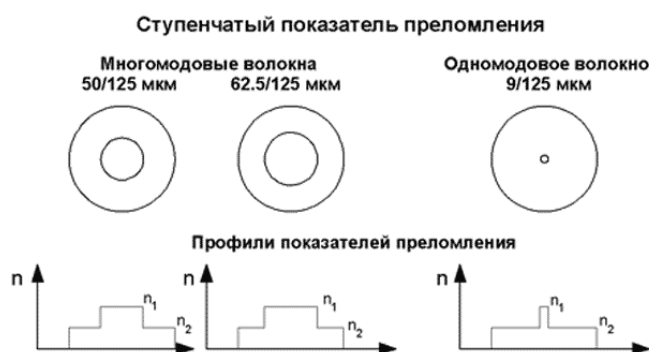


Рисунок 2.1 – Ступенчатый показатель преломления

Сперва и одномодовые, и многомодовые волокна имели ступенчатый показатель преломления. Технология изготовления такой продукции была достаточно проста, и она имела большое распространение. Однако со временем выяснилось, что если в одномодовых волокнах ступенчатый показатель преломления приемлем и обеспечивает достаточно хорошие результаты передачи сигналов, то в многомодовых волокнах (в основном именно из-за многомодовости) возникает целый ряд нежелательных эффектов, когда сигнал на выходе размывается и утрачивает исходную форму. Комплексное название этих явлений - дисперсия.

Дисперсия - это рассеивание во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала, которое приводит к увеличению длительности импульса оптического излучения при распространении его по оптическому волокну. Дисперсия не только ограничивает частотный диапазон оптического волокна, но и существенно снижает дальность передачи

сигналов, т.к. чем длиннее линия, тем больше увеличение длительности импульсов.

В общем случае дисперсия определяется тремя основными факторами:

- различием в скорости распространения разных мод;
- направляющими свойствами оптического волокна;
- физическими параметрами материала волокна.

Дисперсия мод (она же модальная, модовая, межмодовая или многомодовая дисперсия, в зависимости от литературного источника) приводит к рассеиванию сигнала за счет того, что разные лучи распространяются по разным путям (модам). Одни из них проходят меньшее, другие большее расстояние, в результате чего сигнал размывается по времени.

Межмодовая дисперсия возрастает с увеличением длины волокна. Этот вид дисперсии является основным фактором, затрудняющим передачу сигналов по многомодовым волокнам.

Хроматическая (она же частотная) дисперсия является следствием того, что длина волны испускаемого источником света не однозначна, а лежит в определенном диапазоне длин волн, т.е. в спектре. Лучи с разной длиной волны (даже в одной и той же моде) распространяются с разной скоростью, что приводит к рассеиванию сигнала на выходе. Хроматическая дисперсия складывается из внутримодовой (волноводной) дисперсии, материальной дисперсии и профильной дисперсии.

Материальная дисперсия определяется различием в скорости распространения сигналов из-за разницы в длинах волн. Этот параметр очень важен для одномодовых волокон.

Волноводная дисперсия обусловлена направляющими свойствами волокна, поскольку свет распространяется в ядре и в демпфере с разными скоростями, и на границе раздела сред возникают довольно сложные явления, на которые также влияет длина волны. Этот параметр также критичен для одномодового волокна.

Профильная дисперсия, некоторыми источниками не выделяемая в отдельное явление (тогда ее считают составной частью волноводной дисперсии), определяется соотношением коэффициентов преломления ядра и демпфера и профилем раздела сред. Ранние многомодовые волокна имели ступенчатый показатель преломления, но затем для снижения дисперсии были разработаны волокна с т.к. градиентным показателем преломления. В таких волокнах отсутствует четкая граница раздела сред, поскольку показатель преломления в них меняется постепенно.

Градиентный показатель преломления

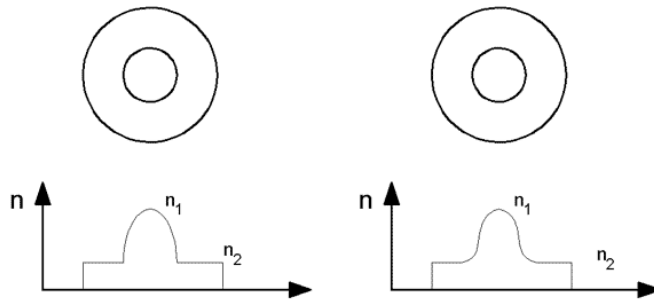


Рисунок 2.2 –Градиентный показатель преломления

Это позволяет уменьшить дисперсию - лучи, проходящие дальше от центра ядра, преодолевают больший путь, чем лучи, близкие к оси световода, но зато они распространяются в среде с меньшим показателем преломления, то есть их скорость выше, за счет чего и происходит компенсация, синхронизация мод. В настоящее время подавляющее большинство многомодовых волокон имеет градиентный показатель преломления.

Помимо этого усовершенствования, за последние годы было значительно улучшено качество материала световодов и его чистота, свобода от посторонних включений и примесей. Это благоприятно повлияло на характеристики и многомодовых, и одномодовых волокон. Были разработаны одномодовые волокна со смещенной дисперсией, в которых на определенной длине волны материальная и волноводная дисперсия компенсировали друг друга. Было изучено явление распространения поляризованного сигнала в одномодовом волокне и соответствующая дисперсия, и другие эффекты.

Когда стали все больше и больше распространяться гигабитные приложения, выяснилось, что обычное многомодовое волокно в состоянии обеспечивать нужную полосу пропускания только на ограниченных расстояниях. Казалось бы, если вместо обычных светодиодных источников взять новые быстродействующие лазеры VCSEL (лазеры поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором) или обычные лазеры, то должна быть возможна реализация гигабитных приложений по уже существующим многомодовым волокнам, однако эта идея натолкнулась на некоторые препятствия. Светодиодные источники дают широкий пучок света (пятно) и буквально заполняют (а то и переполняют) ядро модами. Лазерные источники дают узкий, сильно сфокусированный пучок. При попытке передать такой пучок по многомодовому волокну выявились чудовищные искажения сигнала. Выяснилось, что обычные многомодовые волокна точно по оси, центру ядра, имеют дефекты, скачок показателя преломления, объясняемый технологией изготовления волокна на заводах.

Дефекты строения волокна

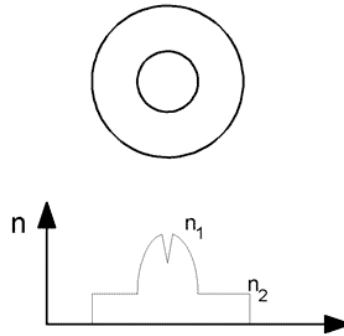


Рисунок 2.3 – Дефекты строения волокна

Широкий пучок от светодиодного источника "не замечал" этих неоднородностей, поскольку дисперсия мод вызывала гораздо более серьезные проблемы, и на их фоне осевые дефекты скрадывались. Как только по многомодовым волокнам стали пропускать узкий пучок от лазера, вводя его по центру ядра, явление проявилось во всей своей полноте. Проблема нашла два решения:

- децентрированное введение пучка света (с помощью специальных волоконно-оптических переключателей, оконцованных специально разработанными коннекторами);

- разработка более высококачественных многомодовых волокон с градиентным показателем преломления, не имеющих провалов в профиле.

Новые волокна, конечно, дороже, зато позволяют реализовать не только 1-гигабитные приложения, но и 10-гигабитные. Сейчас в каталогах производителей можно встретить обозначение MM Laser Grade - это многомодовые волокна улучшенной конструкции, оптимизированные для использования лазерных источников и не требующие смещенного ввода светового пучка. Это позволяет в некоторых случаях многомодовым волокнам конкурировать с одномодовыми, предоставляя заказчикам возможность выбора.

Возвращаясь к вопросу о потерях, следует отметить, что любая неидеальность в волокне служит причиной ухудшения сигнала. И дисперсия, и затухание в волокне могут расти в результате макро- и микро-изгибов, из-за наличия посторонних включений, неравномерностей в изменении коэффициента преломления, из-за неправильной заделки волокна, несоответствующего монтажа, использования оптического кабеля вне рабочего диапазона температур и т.п. В условиях проникающей радиации оптическое волокно тускнеет, и это сужает возможности использования волоконной оптики на специфических объектах.

Температурные деформации также могут внести свою лепту в ухудшение характеристик волоконной оптики. Для внутренней прокладки (то есть в условиях небольшого разброса температур) предназначен кабель с

плотным буфером. Плотный буфер, прилегающий непосредственно к световоду, обеспечивает хорошую защиту от физических воздействий. Температурные деформации внутри помещений невелики, ими можно пренебречь. Для внешней прокладки предназначен кабель со свободным буфером, где пространство между собственно световодом и его оболочкой или оставлено пустым, или заполнено гелевым водоотталкивающим составом. Само волокно со свободным буфером менее защищено от физических воздействий, но зато устойчиво к температурным деформациям, поскольку усадка оболочки не приводит к нагрузке или деформации световода. А от физических воздействий защиту обеспечивают внешние оболочки кабеля, которые могут насчитывать много слоев и усиливаться специальными армирующими элементами. Есть даже бронированные виды оптических кабелей, виды, предназначенные для прямого закапывания, а также самонесущие кабели для воздушной прокладки и другие [10].

2.3 Зависимость между скоростью передачи данных и длиной оптической линии

Скорость передачи импульсов в оптическом волокне ограничивается дисперсией, вызывающей смещение, расширение а иногда и наложение импульсов друг на друга. В наибольшей степени это характерно для многомодовых волокон, хотя и в одномодовом волокне дисперсные эффекты тоже присутствуют, только в значительно меньшей степени. Суммарная дисперсия в общем случае рассчитывается как произведение коэффициента D_0 (характеристической дисперсии, выражаемой в наносекундах на километр, ns/km) на длину L_g (показатель g зависит от типа волокна и близок к единице для многомодовых волокон).

$$D = D_0 * L_g \quad (2.12)$$

Для перехода к полосе частот можно воспользоваться приближенной формулой:

$$B \text{ (MHz*km)} = 350 / D \text{ (ns/km)} \quad (2.12)$$

Таким образом, в общая зависимость между скоростью передачи данных и длиной - обратная пропорциональность. Если говорить о конкретных ограничениях по длине для реализации тех или иных приложений, необходимо обратиться к положениям телекоммуникационных стандартов, в частности, к таблице по длине и затуханию для разных типов волокна (ANSI/TIA/EIA-568) [10].

2.4 Заключение по теоритической части

Ранее был проведен анализ литературных источников по различным технологиям построения участков сети доступа, Было показано, что наиболее

используемым в современных телекоммуникационных сетях является технология FTTH построенная на одномодовом оптическом волокне. Такой подход объясняется тем что оптический световод является самой совершенной средой передачи информации вследствие низкого затухания сигнала и наименьших потерь на участках приема передачи. Поэтому для дальнейших исследований была выбрана оптическая топология типа звезда определяющая тип технологии FTTH Ethernet P2P на исследуемом участке последней мили. Данный выбор обоснован тем что для абонента предлагается выделенная оптическая линия, которая располагает потенциалом гибкости архитектуры без изменения существующей инфраструктуры.

Во второй главе были описаны факторы влияющие на качество передачи в канале связи и пропускную способность сети в целом. Основополагающими здесь являются дисперсия волокна зависящая от состава и материала волокна при производстве и длины волны источника излучения, а также собственных потерь, складывающихся из потерь на поглощении и потерь на рассеивание. На данное время все факторы сводятся к производителю, который дает технические спецификации оптического волокна, а также оборудования для проектирования сети. Влияния потерь на пропускную способность рассчитывается на единицу длины кабельного участка и будет зависеть от протяженности линии. Из анализа литературных источников видно есть прямая зависимость влияния самой скорости на все исследуемые параметры. В дальнейшем сам проектировщик производит связку тех или иных параметров при построение реальной сети. Для этого в экспериментальной части будет рассмотрено моделирование сети доступа.

3. Исследование факторов влияющих на скорость передачи в волоконном световоде на участке последней мили

Целью данной диссертационной работы является Исследование влияния мощности, затухания сигнала, длины абонентской линии на скорость передачи в сетях ВОЛС на основе качественных требований к переданной информации.

Стоит отметить, что современные ВОЛС являются сложными и затратными сетями. Качество передачи информации по таким системам зависит от большого числа характеристик среды передачи, оптического сигнала, приёмопередающих и усилительных устройств, от самой скорости передачи данных в таких сетях. Процесс ввода в коммерческую эксплуатацию волоконных оптических систем предшествует огромное количество производимых плановых действий. Изначально система ВОЛС планируется и сопоставляется с местом ее расположения затем производится создание инфраструктуры. Самым массивным действием в планирование является экспериментальные и численные исследования которые в свою очередь влияют на выбор оптимальных и более подходящих значений всех

характеристик используемых в будущем на сети. Учитывая этот факт, а также всё вышеизложенное, можно сделать вывод, что имитационное моделирование в современных ВОЛС с использованием высокопроизводительных вычислительных комплексов является сложной и актуальной задачей.

Для выполнения эксперимента был проведен анализ программного обеспечения или вычислительных комплексов по моделированию, проектированию и расчёту сетей основанных на оптических линиях передачи данных.

В список исследуемых программ входят:

- Opnet. Программа OpNet представляет собой комплекс средств для создания, моделирования и изучения сетей связи. Позволяет анализировать воздействия приложений типа клиент-сервер и новых технологий на работу сети; моделировать иерархические сети, многопротокольные локальные и глобальные сети с учетом алгоритмов маршрутизации; осуществлять оценку и анализ производительности смоделированных сетей. Также с помощью пакета можно осуществить проверку протокола связи, анализ взаимодействий протокола, оптимизацию и планирование сети.

-Net-Simulator. Эта программа предназначена для образовательных целей. NET-Simulator позволяет строить виртуальные вычислительные сети из виртуальных сетевых устройств: маршрутизаторов, настольных компьютеров, концентраторов и т.п. Устройствами можно управлять при помощи интерфейса командной строки из виртуальных терминалов. В виртуальных сетях реализованы физический, канальный и сетевой уровни в соответствии с ISO OSI, что достаточно для обучения студентов конфигурированию и поиску неисправностей в вычислительных сетях

-OptiSystem. Всесторонний комплект проектирования программного обеспечения, который позволяет пользователям планировать, протестировать, и моделировать оптические каналы в уровне передачи современных оптических сетей.

Произведенный анализ программных комплексов для проведения имитационного моделирования сети ВОЛС выделил продукт Optisystem 7.0 от компании Optiwave. Данный программный продукт позволяет изменять параметры функциональных блоков, имеет наиболее расширенную и подверженную изменениям настройку по конфигурации сети (от оптического волокна до генератора случайных последовательностей), а также наглядно демонстрирует результаты проведенных исследований. Одной из главных проблем для оптических систем является малое количество программных продуктов для моделирования, а так же их закрытость для изучения.

3.1 Проведения эксперимента

На основе заключения по первой главе для эксперимента были выбраны следующие основополагающие данные.

Так как основу для нас составляет технология FTTH Ethernet P2P то в качестве рассмотрения взята одна линия которая будет соединять приемопередающие терминалы транспортной и пользовательской сети. В качестве линии взята современное оптическое волокно Corning's SMF-28e+® имеющие наилучшие параметры и запущенно в коммерческую продажу. Длина участка для экспериментов выбрана с учетом классической модели «последней мили» и составляет расстояние от 1-5 километров. Длина волны выбрана $\lambda=1550\text{нм}$ так как согласно спецификациями оптического волокна в данном оптическом окне прозрачности происходят минимальные затухания и влияние поляризационной дисперсии.

В ходе работы была смитирована модель канала со следующими исходными параметрами:

- а) тип волокна: SMF (Single mode fiber);
- б) расстояние: 5 км;
- в) мощность: 2dBm;
- г) длина волны; $\lambda=1550\text{нм}$;

На Рисунке 3.1 Показана схема имитационной модели где передающий тракт состоит из:

- 1) Генератора псевдослучайной последовательностей
- 2) Генератора импульсов NRZ
- 3) CW laser - лазер непрерывного излучения
- 4) Модулятор Маха-Цендера

Приемный тракт состоит из:

- 5) Оптический Фильтр Бесселя
- 6) Фотодетектор PIN
- 7) Низкочастотный Фильтр Бесселя
- 8) BER анализатор (применяется для контроля битовой ошибки при передаче).

Данная построение конфигурационных блоков соответствует реально существующим и используемым на сетях. Так же в процессе моделирования участвуют измерители оптической мощности для мониторинга оптических уровней в точках контроля за сигналом для оценки исследуемых параметров.

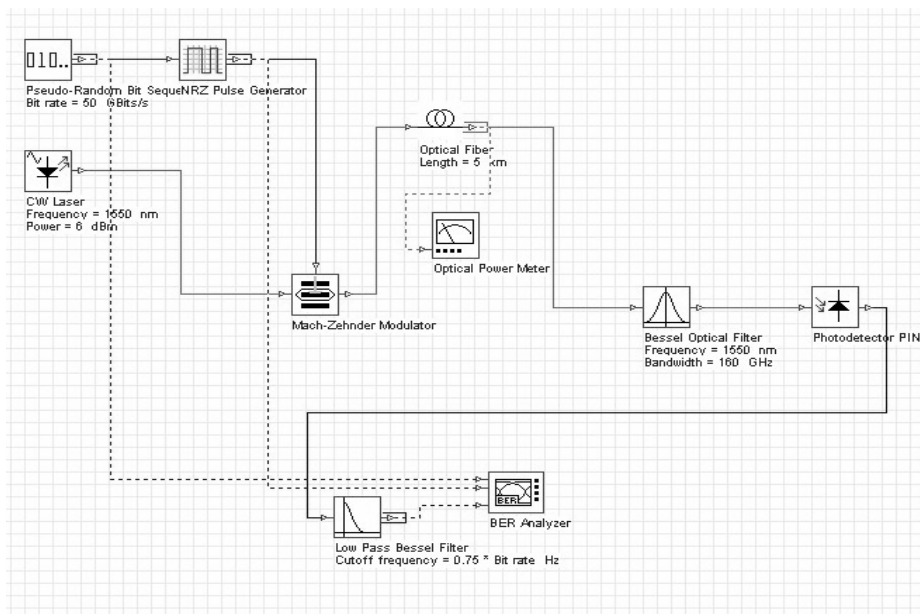


Рисунок 3.1 - Схема канала передачи данных.

В эксперименте было исследовано влияние скорости на качество передаваемой информации основанное по оценки BER (Bit error rate) при статических исходных параметрах канала с дальнейшим изменением одного из параметров. Изменение оптической мощности для прослеживания вносимых данным параметром искажений и влияния на скорость передачи и качества получаемого приемной стороной сигнала. Изменение скорости передачи данных с прослеживанием и доказательством прямой зависимости влияния на канал связи в целом. Полученные в ходе эксперимента данные сведены в таблицу 3.1. И соответственно построен график зависимостей для более детального рассмотрения (Рисунок 3.2).

Таблица 3.1 - Влияния длины участка на скорость передачи

Скорость Gbits/s	Затухание	minBER
Расстояние 1 км		
40	-1,385	0
50	-1,484	6,97E-252
60	-1,456	7,37E-30
70	-1,318	2,45E-10
80	-1,352	2,55E-05
90	-1,377	2,16E-03
100	-1,375	0,013369
Расстояние 2 км		
40	-1,585	5,95E-81
50	-1,684	6,88E-61
60	-1,656	9,23E-11
70	-1,518	0,00034

80	-1,552	0,01515
90	-1,578	1
100	-1,576	1
Расстояние 3 км		
40	-1,784	1,15E-72
50	-1,884	7,65E-15
60	-1,856	0,003938
70	-1,718	0,03401
80	-1,752	1
90	-1,778	1
100	-1,776	1
Расстояние 4 км		
40	-1,985	3,87E-40
50	-2,084	4,18E-06
60	-2,056	0,02771
70	-1,918	1
80	-1,952	1
90	-1,978	1
100	-1,975	1
Расстояние 5 км		
40	-2,185	1,03E-15
50	-2,284	0,003511
60	-2,256	1
70	-2,118	1
80	-2,152	1
90	-2,178	1
100	-2,176	1

Полученные данные говорят что оптимальная скорость передачи данных для построенной имитационной модели является 40Gbits/s. Данное число обусловлено наименьшим затуханием в волоконном световоде на протяжении все длины исследуемого отрезка а так же оптимальным значением BER соответствующим стандартам ITU-T (для волоконных систем передачи данных BER=10⁻¹²).

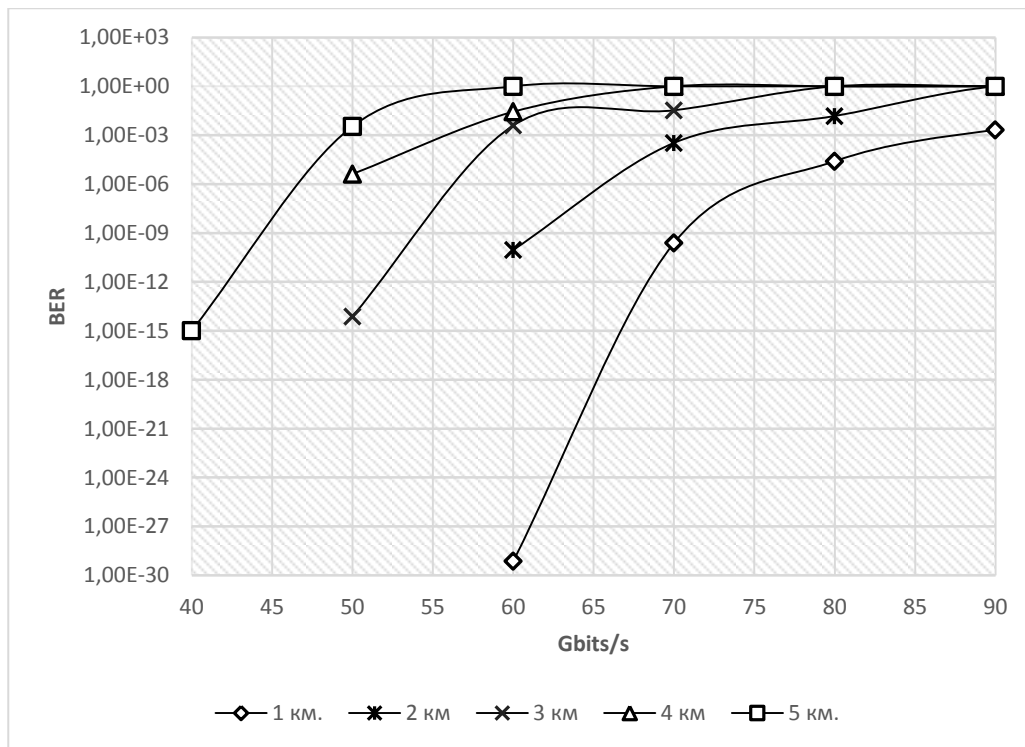


Рисунок 3.2 - Влияние изменения скорости. (P=2dBm)

В таблицу 3.2 сведено продолжение эксперимента. Продолжение эксперимента заключается в повышении эффективности сети за счет увеличения входной мощности сигнала. Для этого выбраны три скорости при которых происходит заметная деградация качества информации и производится эксперимент с увеличением от 2дБм до 5 дБм. В=50Gbits/s L=5 км так как при данных параметрах происходит мгновенная деградация сигнала. По полученным данным построена гистограмма для более детальной наглядности. По гистограмме можно сделать вывод что оптимальная мощность излучения лазерного диода составляет 2 дБм. Данное число обусловлено минимальной потребляемой мощностью оборудования, а так же дальнейшее увеличение мощности приводит лишь к более массивным искажениям в тракте передачи. Для проведения исследования влияния мощности взяты крайние значения.

Таблица 3.2 - Влияние увеличения мощности на скорость передачи

Скорость Gbits/s	Затухание	minBER
P=3dBm		
50	-1,284	0,003441
60	-1,256	1

70	-1,118	1
P=4dBm		
50	-0,284	0,003425
60	-0,256	1
70	-0,117	1
P=5dBm		
50	0,716	0,0034
60	0,743	1
70	0,882	1
P=6dBm		
50	1,716	0,0033
60	1,744	1
70	1,882	1

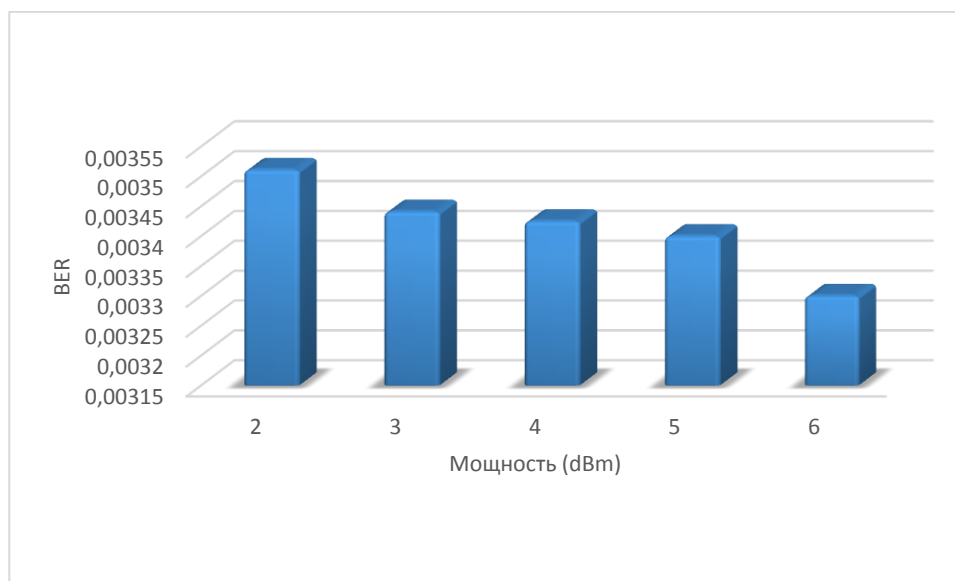


Рисунок 3.3 - Влияние изменения мощности при статических параметрах.

Для более детального рассмотрения и прослеживания деградации приведены графики Глаз Диаграмм из всех приведенных экспериментов.

Для анализа характеристик цифрового сигнала можно используют Глаз диаграммы. Глаз диаграмма может с большой успешностью использоваться как при проведении лабораторного практикума, так и для эксплуатационного измерения. По своей структуре глаз диаграммы являются модифицированным

видом осциллограмм, с той только разницей, что используют периодическую структуру цифрового сигнала.

Где можно проследить что по мере увеличения скорости происходит закрытие глаз диаграммы. Закрытие или уменьшение раскрыва по вертикали глаз диаграммы свидетельствует от том что количество переданной информации испорчена результирующими искажениями, вызванными межсимвольными помехами, изменениями амплитуды импульсов на выходе.

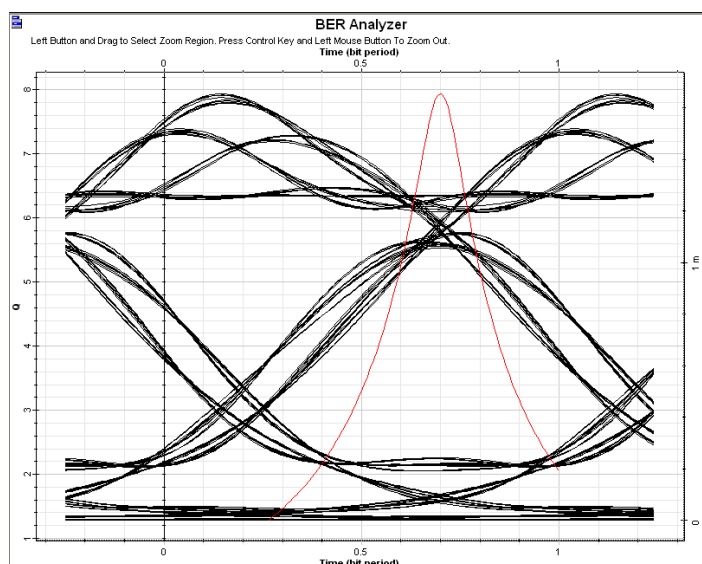


Рисунок 3.4 - Глаз-диаграмма для $L=5\text{км}$ $V=40\text{Gbits/s}$

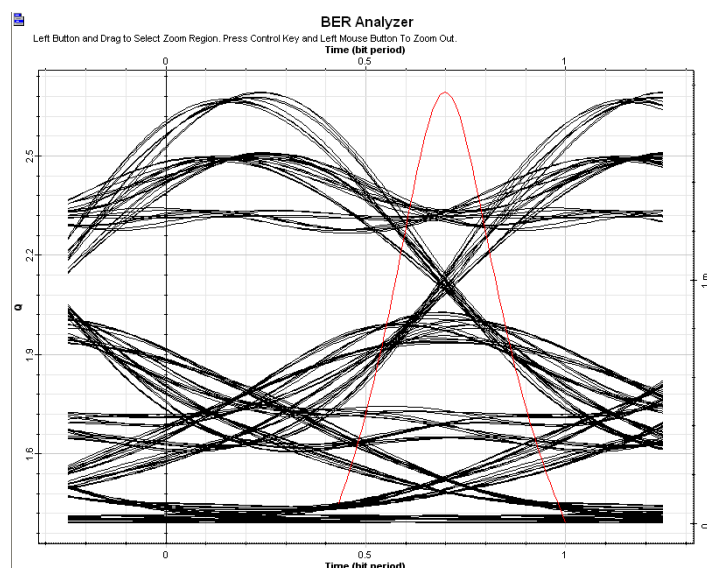


Рисунок 3.5 - Глаз-диаграмма для $L=5\text{км}$ $V=50\text{Gbits/s}$

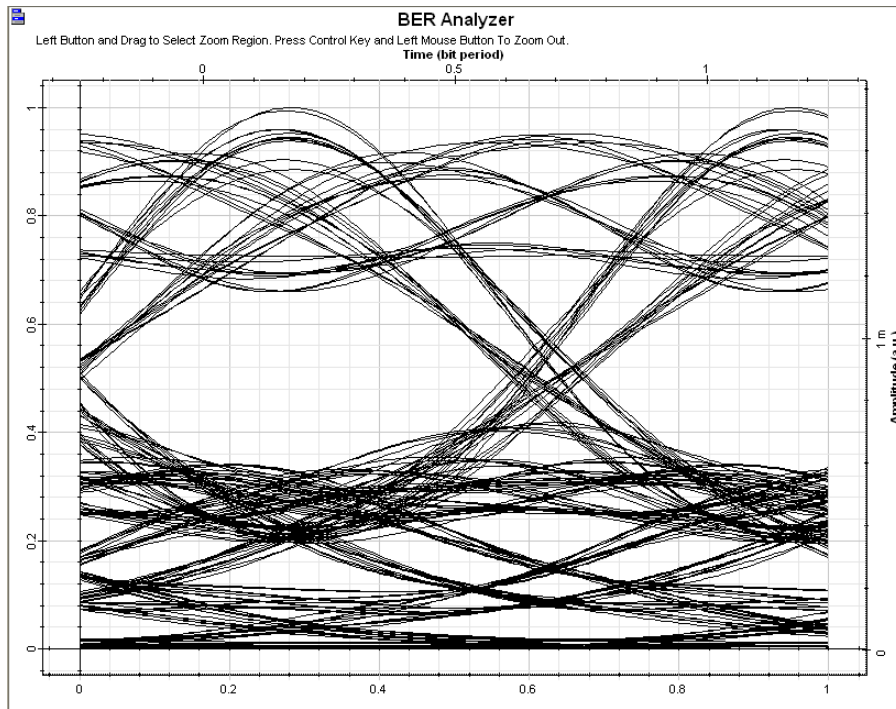


Рисунок 3.6 - Глаз-диаграмма для $L=5\text{км}$ $V=60\text{Gbits/s}$

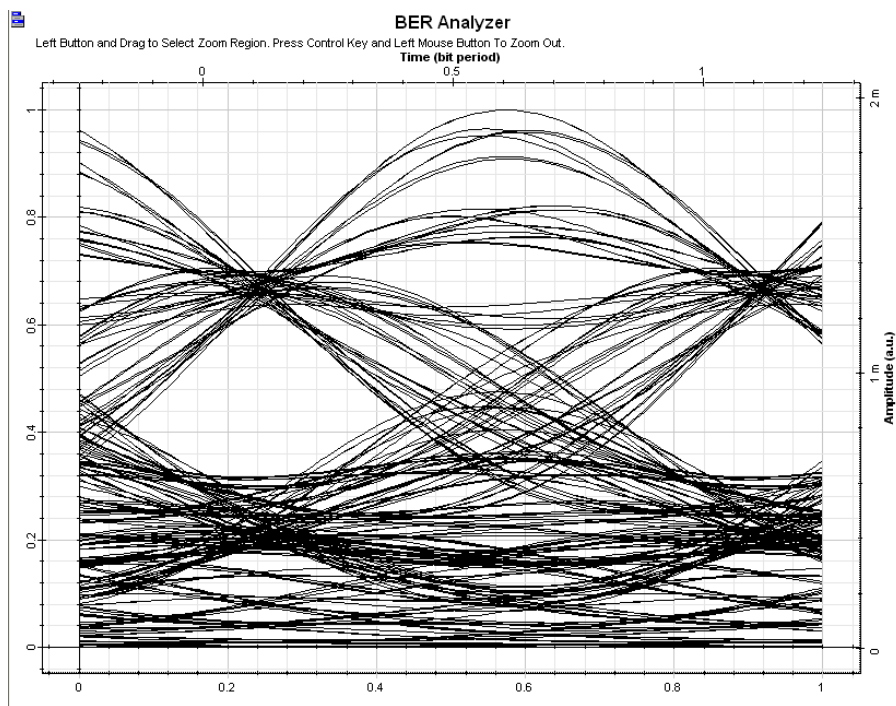


Рисунок 3.7 - Глаз-диаграмма для $L=5\text{км}$ $V=70\text{Gbits/s}$

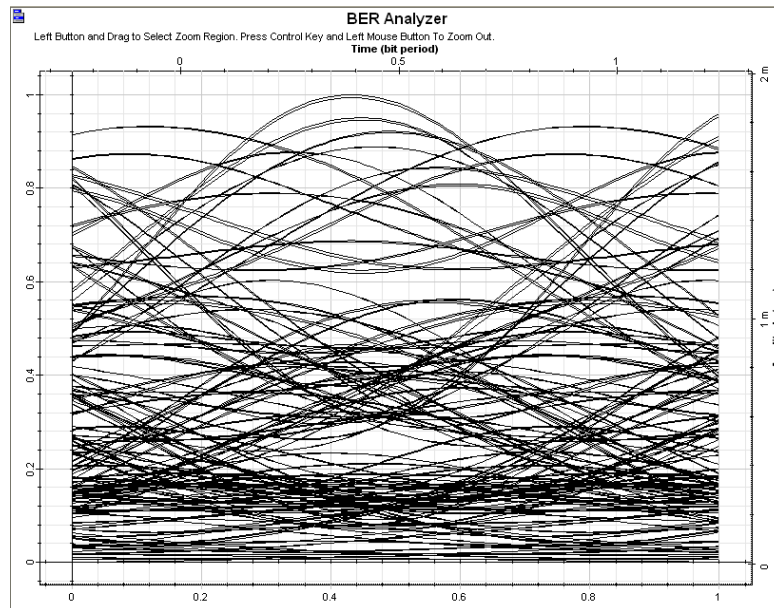


Рисунок 3.8 - Глаз-диаграмма для $L=5\text{км}$ $V=80\text{Gbits/s}$

Из вышеперечисленных графиков видно что структура глаз-диаграммы начинает разрушаться на скорости 60 Gbits/s, BER анализатор в свою очередь понимает что количество ошибок преувеличивает соотношение входных характеристик и выходных характеристик т.е. на 5 км скорость свыше 50 Gbits/s не соответствует требуемому качеству эти данные так же можно проследить из таблицы 3.1.

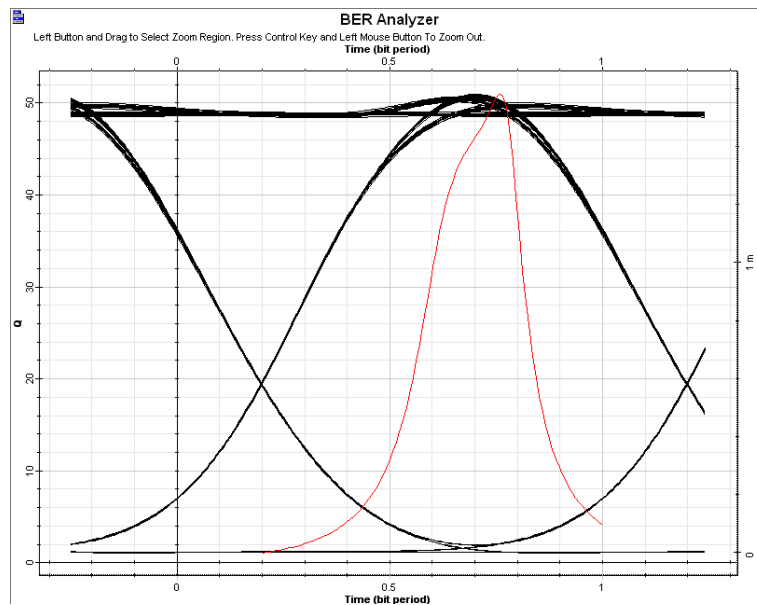


Рисунок 3,9 - Глаз-диаграмма для $L=1\text{км}$ $V=40\text{Gbits/s}$

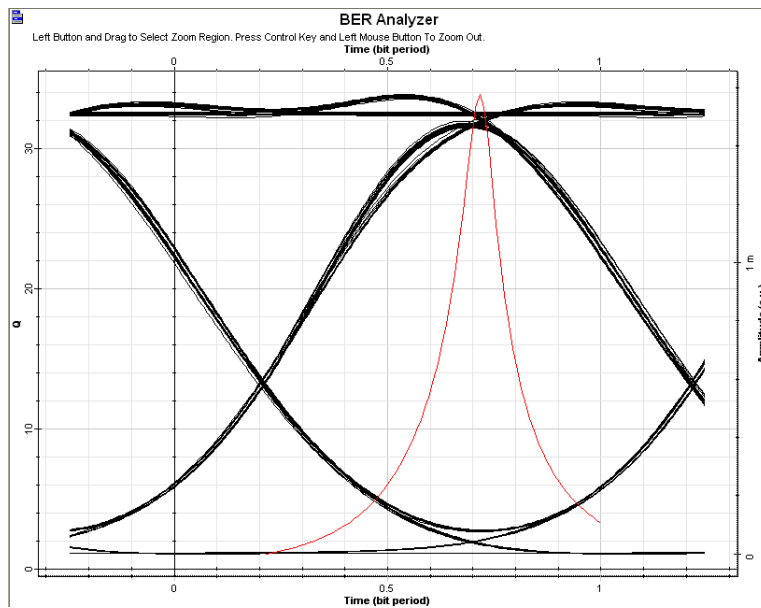


Рисунок 3.10 - Глаз-диаграмма для $L=1\text{ км}$ $V=50\text{ Gbits/s}$

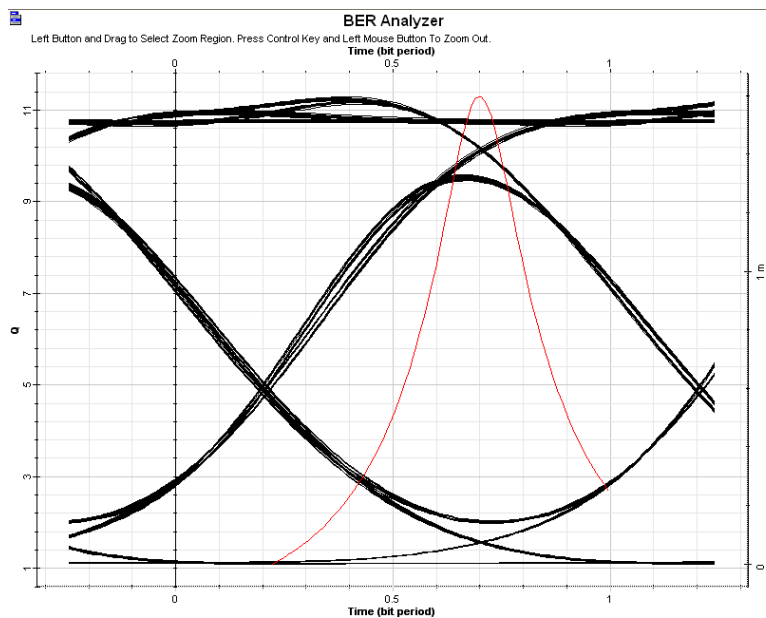


Рисунок 3.11 - Глаз-диаграмма для $L=1\text{ км}$ $V=60\text{ Gbits/s}$

На рисунке видно что после 60Gbits/s мы можем наблюдать лишь незначительное закрытие раскрыва глаз-диаграммы но тем не менее сверившись с таблицей 3.1 можем увидеть что данная скорость уже не может соответствовать рекомендация и стандартам но при этом сохраняется более или менее соотношение количества ошибок между переданной и принятой информацией.

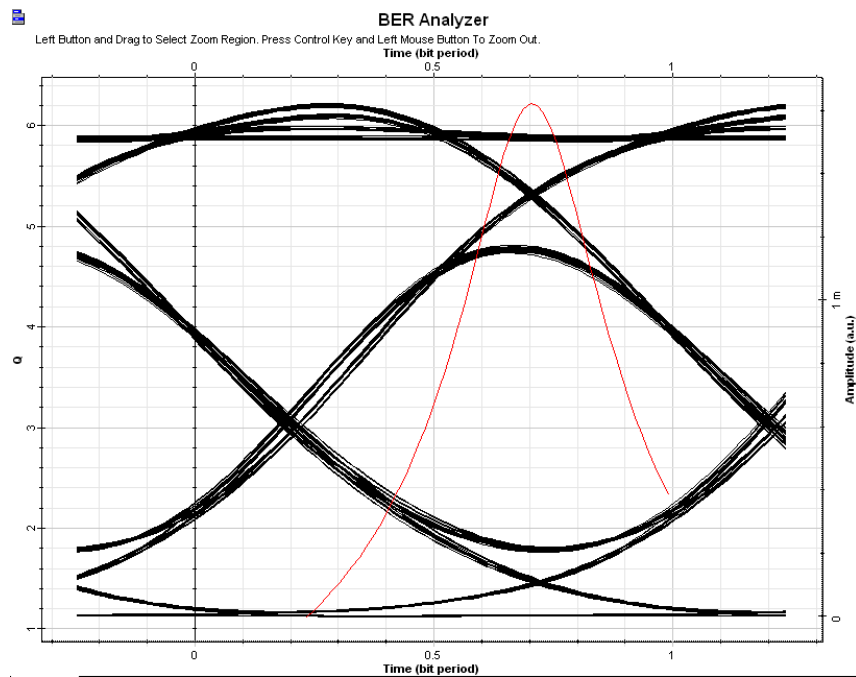


Рисунок 3.12 - Глаз-диаграмма для $L=1\text{км}$ $V=70\text{Gbits/s}$

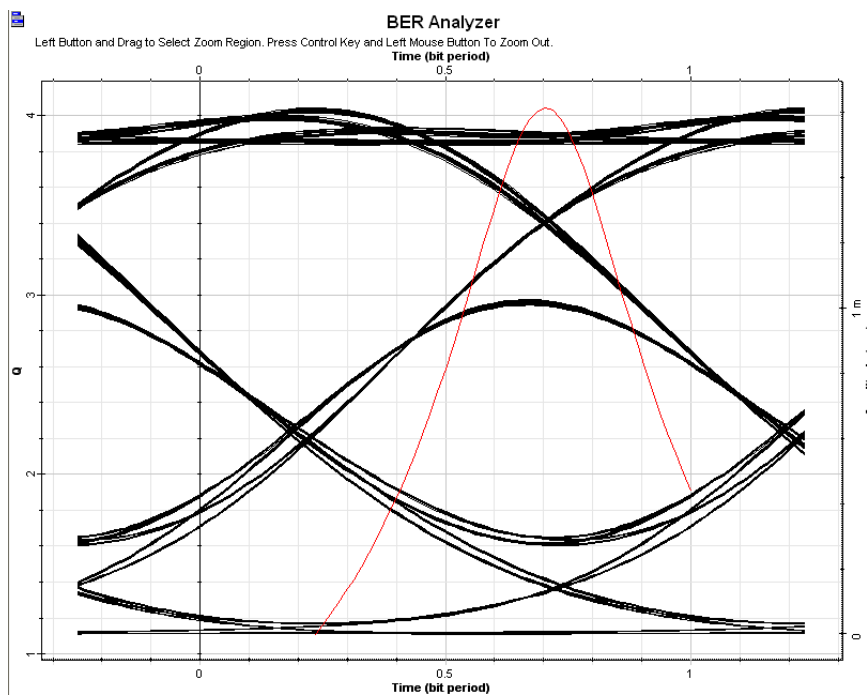


Рисунок 3.13 - Глаз-диаграмма для $L=1\text{км}$ $V=80\text{Gbits/s}$

Таким образом, в ходе проведенного эксперимента были определены оптимальные значения исследуемых факторов для обеспечения максимальной скорости передачи данных, соответствующие заданной рекомендации ITU-T уровню качества BER. Достигнутая в ходе исследования скорость в 40 GBits/s является отличным показателем для участка последней мили так как современный рынок может предоставить для конечного абонента на данной время мегабитные потоки данных ($x < 100 \text{ Mbit/s}$) (зачастую критичных к временным задержкам). Из полученных экспериментальных данных видно что в современных телекоммуникационных сетях в скором времени возможен прорыв к сверхвысоким скоростям без изменения имеющийся инфраструктуры. Данная возможность возможно лишь при переходе полностью на оптические линии передачи данных и полный отказ от медных телекоммуникаций. Все технологии изученные на данное время в полной мере изучены и позволяют сделать этот переход но дешевизна использования меди по прежнему является для провайдеров ключевым моментом.

4. Инженерный расчет

4.1 Расчёт коэффициента затухания

Таблица 4.1 - Исходные данные

Наименование параметра	Условное обозначение	Значение
Опорная длина волны спектрального диапазона O	λ_{so} , нм	1310
Максимальное затухание на опорной длине волны диапазона O	α_{so} , дБ/км	0.35
Опорная длина волны спектрального диапазона E	λ_{se} , нм	1383
Максимальное затухание на длине волны спектрального диапазона E	α_{se} , дБ/км	0.35
Опорная длина волны спектрального диапазона C	λ_{sx} , нм	1550
Максимальное затухание на длине волны спектрального диапазона C	α_{sx} , дБ/км	0.20
Максимальный прирост затухания относительно опорной длины волны в рабочем диапазоне	$\Delta\alpha$, дБ/км	0.02
Длина волны нулевой дисперсии	λ_0 , нм	1324
Наклон нулевой дисперсии	S_0 пс/нм ² ·км	0.092
Максимальное значение PDM	PDM, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0.06

1. Рассчитаем составляющую релеевского рассеяния на длине волны

$$\lambda_{so} = 1310, \text{ нм}$$

$$\bar{\alpha}_{pp} = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{\lambda_{so}^4} = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{1310^4} = 0.214 \text{ дБ/км} \quad (4.1)$$

2. Рассчитаем составляющую потерь инфракрасного поглощения на длине волны $\lambda_{so} = 1310$ нм,

$$\bar{\alpha}_{икп} = 0.9 \cdot \exp\left(\frac{-0.8}{\lambda_{so}}\right) = 0.9 \cdot \exp\left(\frac{-0.8}{1.310}\right) = 0.489 \text{ дБ/км} \quad (4.2)$$

3. Рассчитаем составляющую релеевского рассеяния на длине волны $\lambda_{se} = 1383$ нм

$$\alpha_{pp}(\lambda_{se}) = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{\lambda_{se}^4} = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{1383^4} = 0.172 \text{ дБ/км} \quad (4.3)$$

4. Рассчитаем составляющую потерь инфракрасного поглощения на длине волны $\lambda_{se} = 1383$ нм

$$\alpha_{икп}(\lambda_{se}) = 0.9 \cdot \exp\left(\frac{-0.8}{\lambda_{se}}\right) = 0.9 \cdot \exp\left(\frac{-0.8}{1.383}\right) = 0.505 \text{ дБ/км} \quad (4.4)$$

5. Рассчитаем составляющую релеевского рассеяния на длине волны $\lambda_{sx} = 1550$ нм

$$\alpha_{pp}(\lambda_{sx}) = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{\lambda_{sx}^4} = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{1550^4} = 0.109 \text{ дБ/км} \quad (4.5)$$

6. Рассчитаем составляющую потерь инфракрасного поглощения на длине волны $\lambda_{sx} = 1550$ нм

$$\alpha_{икп}(\lambda_{sx}) = 0.9 \cdot \exp\left(\frac{-0.8}{\lambda_{sx}}\right) = 0.9 \cdot \exp\left(\frac{-0.8}{1.550}\right) = 0.537 \text{ дБ/км} \quad (4.6)$$

7. Рассчитаем параметр $\Delta\alpha_{se}$

$$\Delta\alpha_{se} = \alpha(\lambda_{se}) - \alpha_{pp}(\lambda_{se}) - \alpha_{икп}(\lambda_{se}) = 0.35 - 0.172 - 0.505 = -0.327 \text{ дБ/км} \quad (4.7)$$

8. Рассчитаем параметр $\Delta\alpha_{sx}$

$$\Delta\alpha_{sx} = \alpha(\lambda_{sx}) - \alpha_{pp}(\lambda_{sx}) - \alpha_{икп}(\lambda_{sx}) = 0.20 - 0.109 - 0.537 = -0.446 \text{ дБ/км} \quad (4.8)$$

9. Рассчитаем параметр $\delta\lambda^2$

$$\delta\lambda^2 = \frac{\Delta\alpha_{sx}}{\Delta\alpha_{se} - \Delta\alpha_{sx}} \cdot (\lambda_{sx} - \lambda_{se})^2 = \frac{-0.446}{-0.327 + 0.446} \cdot (1.550 - 1.383)^2 = -0.105 \text{ мкм}^2 \quad (4.9)$$

10. Рассчитаем коэффициент C_{oh}

$$C_{oh} = \Delta\alpha_{se} \cdot \delta\lambda^2 = -0.327 \cdot (-0.105) = 3.4 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2 \cdot \text{дБ/км} \quad (4.10)$$

11. Рассчитаем составляющую потерь, обусловленную примесями ОН

$$\bar{\alpha}_{oh} = \frac{C_{oh}}{(\lambda_{so} - \lambda_{se})^2 + \delta\lambda^2} = \frac{3.4 \cdot 10^{-2}}{(1.310 - 1.383)^2 - 0.105} = -0.341 \text{ дБ/км} \quad (4.11)$$

12. Рассчитаем коэффициент затухания

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{pp} + \bar{\alpha}_{укл} + \bar{\alpha}_{oh} = 0.214 + 0.489 - 0.113 = 0.59 \text{ дБ/км} \quad (4.12)$$

13. Рассчитаем результирующий коэффициент затухания

$$\alpha_{\max} = \bar{\alpha} + 0.05 = 0.59 + 0.05 = 0.64 \text{ дБ/км} \quad (4.13)$$

Рассчитанная рабочая длина волны попадает в стандартный “С” спектральный диапазон (1530 нм - 1565 нм).

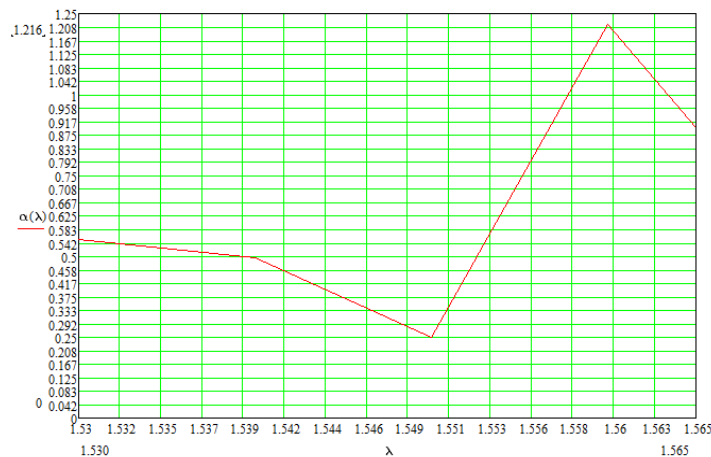


Рисунок 4.1 - Спектральная характеристика затухания.

4.2 Расчёт хроматической дисперсии

Таблица 4.2 - Исходные данные

Длина волны нулевой дисперсии	λ_0 , нм	1324
Наклон нулевой дисперсии	S_0 , пс/нм ² · км	0.092
Рабочая длина волны	λ_c , нм	1550

$$D_{OB}(\lambda_c) = \frac{S_0}{4} \cdot \left(\lambda_c - \frac{\lambda_0^4}{\lambda_c^3} \right) = \frac{0.092}{4} \cdot \left(1550 - \frac{1324^4}{1550^3} \right) = 16.671 \text{ пс/нм} \cdot \text{км} \quad (4.14)$$

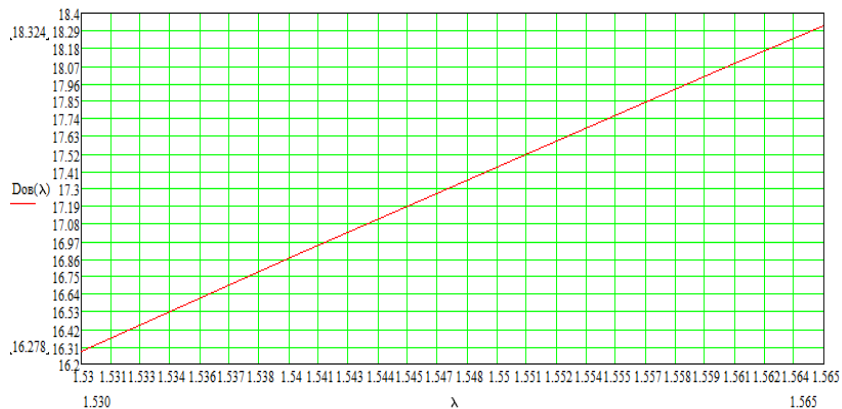


Рисунок 4.2 - Изменение дисперсионных характеристик ОВ.

4.3 Расчёт дисперсионных характеристик ОВ на ЭКУ

Длина участка ВОЛП ограничивается не только затуханием, но и дисперсией линии передачи.

Скорость передачи в линии $B = 40$ Гбит/с,

1. Рассчитаем максимальное допустимое значение хроматической дисперсии

$$D_{py} = \frac{104000}{B^2} \cdot \Delta\lambda = \frac{104000}{(40)^2} \cdot 0.1 = 6.5 \text{ пс/нм} \quad (4.15)$$

$$PMD_{py} = \frac{140}{B} = 3.5 \text{ пс} \quad (4.16)$$

Поляризационная модовая дисперсия

2. Рассчитаем приведенное значение хроматической дисперсии оптической линии передачи

$$D_{ch} = D_{OB} \cdot \Delta\lambda = 16.671 \cdot 0.1 = 1.671 \text{ пс/нм} \quad (4.17)$$

3. Рассчитаем прогнозируемые значения хроматической и поляризационной модовой дисперсий

$$D_{ном} = D_{ch} \cdot L_{ном} = 1.671 \cdot 3 = 5.013 \text{ пс} \quad (4.18)$$

$$PMD_{ном} = PMD \cdot \sqrt{L_{ном}} = 0.06 \cdot \sqrt{3} = 0.104 \text{ пс} \quad (4.19)$$

$$D_{мин} = D_{ch} \cdot L_{мин} = 1.671 \cdot 1 = 1.671 \text{ пс} \quad (4.20)$$

$$PMD_{мин} = PMD \cdot \sqrt{L_{мин}} = 0.06 \cdot \sqrt{1} = 0.06 \text{ пс} \quad (4.21)$$

$$D_{max} = D_{ch} \cdot L_{max} = 1.671 \cdot 5 = 8.355 \text{ пс} \quad (4.22)$$

$$PMD_{max} = PMD \cdot \sqrt{L_{max}} = 0.06 \cdot \sqrt{5} = 0.3 \text{ пс} \quad (4.23)$$

Закключение

За все существование сетей связи продолжается неуклонный рост в обмене и потребности больших емкостей при передаче трафика пользователями. Нехватка высоких скоростей на участке «Последней мили» все больше ограничивает пользователя в тех или иных используемых приложениях и услугах. Оптические линии связи еще раз доказывают свою прогрессивность и большой потенциал в развитии скоростных характеристик на всех участках телекоммуникационных сетей.

В диссертационной работе исследование факторов влияющих на скорость передачи в волоконном световоде на участке последней мили рассмотрено понятие, краткая история развития, проблемы и перспективы их решения. Произведен анализ принципа развёртывания и работы сети на основе современной технологии FTTH Ethernet P2P. Также приведен анализ и рассмотрены физические характеристики влияния в волоконном световоде на скорость передачи.

В работе на основе произведенного анализа были применены оптимальные параметры и на их основе построенная сеть подвергалась экспериментальному обследованию. Эксперимент проходил на сети расстоянием от 1 до 5 километров которое соответствует классической модель «последней мили». Длина волны выбрана 1550 нм так как на данной длине волне в выбранном оптическом световоде происходит наименьшее затухание. Эксперимент проводился с актуальными в развитии скоростями от 40 до 100 Gbits/s. Из графика на рисунке видно, что изменение скорости оказывает огромное влияние на длину используемого участка т.е. чем больше выбранное расстояние тем быстрее наступает деградация передаваемой информации с увлечением скорости и конечный пользователь получает не соответствующее рекомендация ITU-T качество услуги. Доказательство ухудшения сервиса можно проследить на рисунках 3.4-3.13 где приводиться глаз диаграммы BER анализатора на которых прослеживается закрытие глаза по вертикали что соответствует неправильно принятым битам. На графике с рисунке 3.3 показывает что дальнейшее увеличение мощности на лазере не оказывает ощутимого улучшения качества передаваемой информации что в свою очередь показывает что затраты на более мощное оборудование в таких сетях нерентабельно. Таким образом даже применение 40 Gbits/s на расстояние 5 километров являться прекрасным показателем т.к. по последним данным на сегодняшний день единственная построенная сеть в США компанией US Internet и принятая в коммерческую эксплуатацию сеть может предоставлять скорости равные 10 Gbits/s.

Список литературы

1. Макаренко С.И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. - Ставрополь: СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2008. - 352 с.
2. Теория телекоммуникационных систем и сетей. Курс дистанционного обучения СибГУТИ [Электронный ресурс]. -2013.-URL:
3. http://ndo.sibsutis.ru/magistr/courses_work/ttss_work/lec.htm (дата обращения 1.09.2013).
4. Барабаш П., Воробьев С., Махровский О. Новые времена, новые сети // Каталог «Технологии и средства связи» [Электронный ресурс]. - 2008. - URL: www.tssonline.ru/articles2/Oborandteh/new-times-new-networks (дата обращения 1.09.2013).
5. Ги Кайя. Об абонентском доступе // Сети и системы связи. - 1996. - № 6.
6. Горнак А.М. Организация доступа на базе xDSL: современные технологии // Технологии и средства связи. Специальный выпуск «Системы абонентского доступа». - 2004.
7. Современные технологии доступа в сеть Интернет // Технологии DSL [Электронный ресурс]. - URL: www.xdsl.ru (дата обращения 1.09.2013).
8. Барабаш П., Воробьев С., Махровский О. Проводные технологии сетей абонентского доступа: принципы построения, классификация // Каталог «Технологии и средства связи» [Электронный ресурс]. - 2008. - URL: www.tssonline.ru/articles2/Oborandteh/provodnyye-technologii-sad (дата обращения 1.09.2013).
9. Макаренко С. И. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие / С.И. Макаренко, В.Е. Федосеев. - СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. - 179 с.
10. Гасымов И. Архитектура оптических сетей доступа FTTH (Fiber-to-the-Home) // Официальный документ компании Cisco System Inc. 2007. - 12 с.
11. [Http://www.optik64.ru/doc01.htm](http://www.optik64.ru/doc01.htm)- [Http://www.optik64.ru/doc08.htm](http://www.optik64.ru/doc08.htm).
12. Corning SMF-28e+ optical fiber. Product information. – Corning Incorporated 2014.
13. Исследование оптических потерь в телекоммуникационной линии связи. (Описание задачи практикума фотоники и физики микроволн физического факультета МГУ)- МГУ 2014-15с.
14. <http://fb.ru/article/143112/tehnologii-fft---podklyuchenie-interneta>
15. Построение и расчет гибридных СКТ с глубоким проникновением оптики : метод, пособие по днсс. «Современные технологии систем и средств телекоммуникаций» для студ. спец. 1-45 01 01 «Многоканальные системы телекоммуникаций» и 1-45 01 02 «Системы радиосвязи, радио-вещания и телевидения» днев. и заоч. форм обуч. / В Ю. Бунас [и др.]. - Минск : БГУИР, 2012. - 55 с.

Приложение А

Программный комплекс OptiSystem7.0

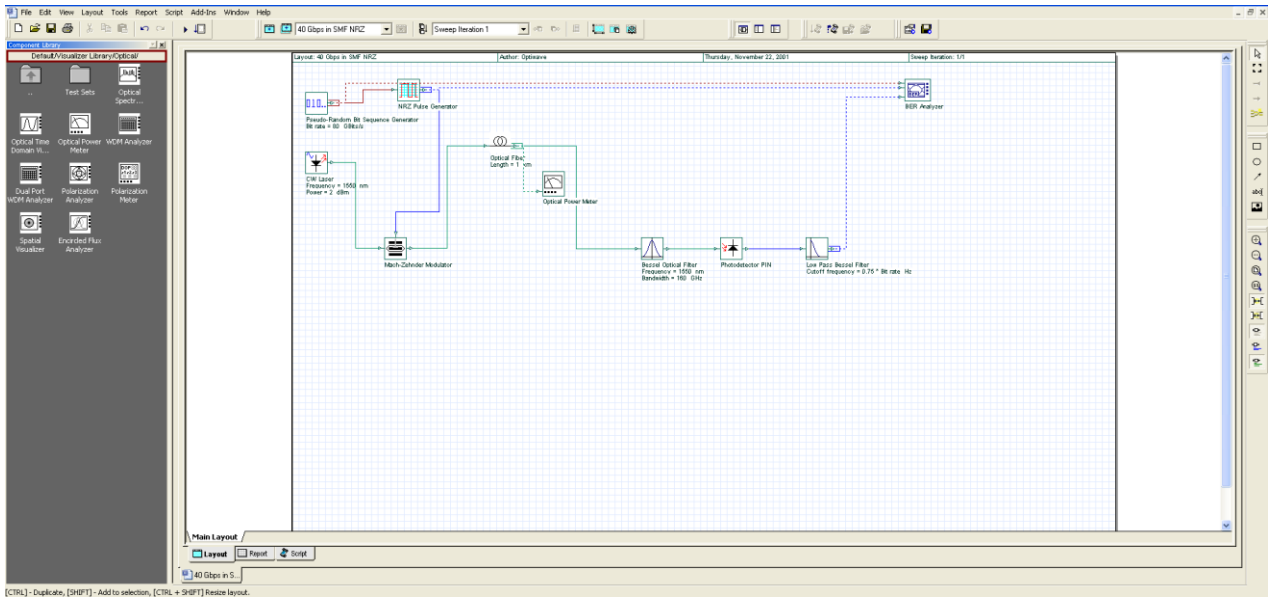


Рисунок А1 – Модель канала связи в программной среде OptiSystem

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Bit rate	80	Gbits/s	Normal
<input type="checkbox"/>	Operation mode	Order		Normal
<input type="checkbox"/>	Order	$\log(\text{Sequence length})/\log(2.5)$		Script
<input type="checkbox"/>	Mark probability	0.5		Normal
<input type="checkbox"/>	Number of leading zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * B$		Script
<input type="checkbox"/>	Number of trailing zeros	$(\text{Time window} * 3 / 100) * B$		Script

Рисунок А2 – Панель настройки конфигурационного блока

Рисунок А3 – Вид оптического визуализатора мощности

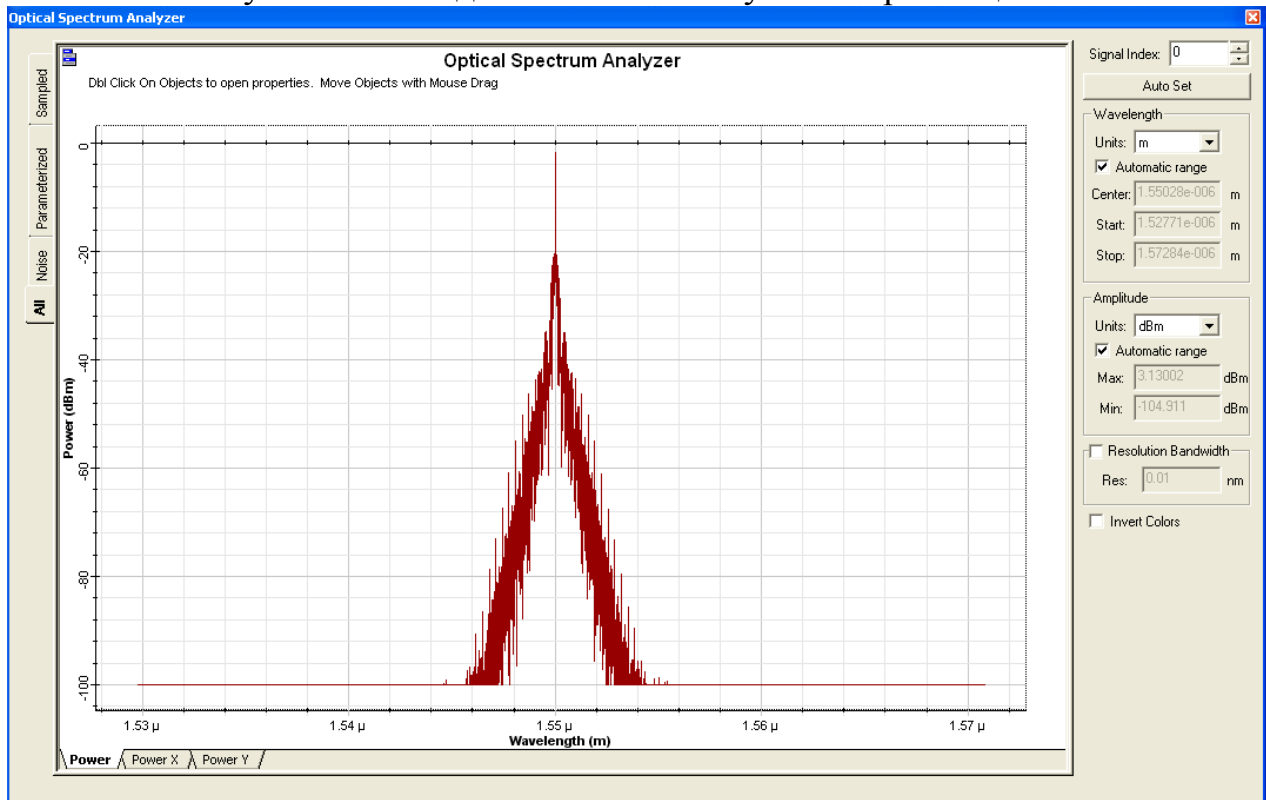


Рисунок А4 – Вид оптического визуализатора спектра.

Генератор псевдослучайных чисел

Синтаксис:

$X = \text{randn}(n)$ randn

$X = \text{randn}(m, n)$ $\text{randn}(\text{'seed'})$

$X = \text{randn}(\text{size}(A))$ $\text{randn}(\text{'seed'}, x0)$

Описание:

Функция $X = \text{randn}(n)$ формирует массив размера $n \times n$, элементами которого являются случайные величины, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 1.

Функция $X = \text{randn}(m, n)$ формирует массив размера $m \times n$, элементами которого являются случайные величины, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 1.

Функция $X = \text{randn}(\text{size}(A))$ формирует массив соразмерный с матрицей A , элементами которого являются случайные величины, распределенные по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 1.

Команда randn без аргументов формирует одно случайное число, распределенное по нормальному закону с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 1, которое изменяется при каждом последующем вызове.

Листинг программы:

$N = n$ - Количество повторений;
 $x = \text{randi}([0 \ 1], 1, N)$ - работать только с двоичным
исчислением

Приложение Б

Характеристики волокна

Corning® SMF-28e+® Optical Fiber

Product Information

CORNING



Corning® SMF-28e+® optical fiber is the industry leader in comprehensive single-mode fiber performance for metro and access networks. It is ITU-T Recommendation G.652.D-compliant and fully backward compatible with legacy standard single-mode fibers. SMF-28e+ fiber is built on Corning's solid foundation of quality and proven performance. Since Corning brought the first fiber to market more than 40 years ago, Corning's leadership in single-mode fiber innovation has been unparalleled.

Optical Specifications

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	≤ 0.35
1383**	≤ 0.35
1490	≤ 0.24
1550	≤ 0.20
1625	≤ 0.23

* Alternate attenuation offerings available upon request.

** Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α.

Macro Bend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.03
50	100	1310	≤ 0.03
50	100	1550	≤ 0.03
60	100	1625	≤ 0.03

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_c)

λ_c ≤ 1260 nm

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm-km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ₀): 1304 nm ≤ λ₀ ≤ 1324 nm

Zero Dispersion Slope (S₀): ≤ 0.092 ps/(nm²-km)

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/√km)
PMD Link Design Value	≤ 0.06*
Maximum Individual Fiber PMD	≤ 0.1

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_c). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled.

How to Order

Contact your sales representative, or call the Optical Fiber Customer Service Department:
 Ph: 1-801-248-2000 (U.S. and Canada)
 +44-1244-525-920 (Europe)
 Email: cofca@corning.com
 Please specify the fiber type, attenuation, and quantity when ordering.

PI1463

ISSUED: JULY 2014
 SUPERSEDES: JUNE 2014

TL9000/ISO 9001 CERTIFIED



Рисунок Б1 – Страница 1 Характеристики волокна

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	≥ 4.0 m radius of curvature
Cladding Diameter	125.0 ± 0.7 μm
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 μm
Cladding Non-Circularity	≤ 0.7%

Coating Geometry

Coating Diameter	242 ± 5 μm
Coating-Cladding Concentricity	< 12 μm

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm, and 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to +85°C*	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-30°C to +85°C up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	23°C ± 2°C	≤ 0.05
Heat Aging	85°C ± 2°C	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range: -60°C to +85°C

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.69 GPa).*

*Higher proof test levels available.

Length

Fiber lengths available up to 63.0 km/spool.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 μm
Numerical Aperture	0.14 NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.
Effective Group Index of Refraction (N_{eff})	1310 nm: 1.4674 1550 nm: 1.4679
Fatigue Resistance Parameter (N_f)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB

CORNING

Corning Incorporated
One Riverfront Plaza
Corning, NY 14801 U.S.A.
Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+46-1244-525-520 (Europe)
Email: corfo@corning.com
www.corning.com/opticalfiber

Corning and SMF-45® are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, NY.

© 2014 Corning Incorporated. All Rights Reserved.

Рисунок Б2 – Страница 2 Характеристики волокна