

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»
Факультет телекоммуникаций
Кафедра метрологии и стандартизации

В. И. Кириллов, Е. А. Коврига

СИСТЕМЫ И СЕТИ ЦИФРОВОГО КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

*Рекомендовано УМО
по образованию в области приборостроения
в качестве учебно-методического пособия
для обучающихся по специальности
1-38 80 01 «Приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы»*

Минск БГУИР 2016

УДК 621.397.743(076)
ББК 32.949я7
К43

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра связи учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №104 от 26.01.2015);

доцент кафедры ядерной физики
Белорусского государственного университета,
кандидат технических наук М. В. Комар

Кириллов, В. И.

К43 Системы и сети цифрового кабельного телевидения : учеб.-метод. пособие / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига. – Минск : БГУИР, 2016. – 107 с. : ил. ISBN 978-985-543-173-3.

Рассмотрены особенности и состояние развития современных систем и сетей цифрового телевидения в связи с переходом на цифровые форматы кодирования и совместное использование цифровых сетей. Приведена универсальная методика определения отношения сигнал/шум и связанного с ним значения вероятности ошибки для всех типов распределительных сетей цифрового кабельного телевидения (волоконно-оптических, коаксиальных и гибридных волоконно-коаксиальных). Рассмотрены основные направления оптимизации параметров пассивных волоконно-оптических сетей (PON) по различным критериям; описана обобщенная блок-схема модели сценария возможных атак на информацию, передаваемую по таким сетям, а также методика определения экономической эффективности защиты информации в сетях PON.

Может использоваться специалистами, занимающимися проектированием и обслуживанием пассивных волоконно-оптических и гибридных волоконно-коаксиальных сетей абонентского доступа.

УДК 621.397.743(076)
ББК 32.949я7

ISBN 978-985-543-173-3

© Кириллов В. И., Коврига Е. А., 2016
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1 Общие сведения о сетях кабельного телевидения и их развитии	8
1.1 Коаксиальные сети кабельного телевидения: основные понятия, причины перехода к цифровому формату и волоконно-оптическим линиям передачи	8
1.2 Общие сведения о волоконно-оптических линиях связи	12
1.3 Особенности пассивных волоконно-оптических линий связи PON	14
1.4 Особенности современных сетей кабельного телевидения	16
Глава 2 Анализ помехозащищенности гибридных сетей цифрового кабельного телевидения	19
2.1 Анализ защищенности от собственных шумов в волоконно-оптических сетях цифрового кабельного телевидения	19
2.1.1 Типовая структура пассивной волоконно-оптической сети цифрового кабельного телевидения	19
2.1.2 Расчет шумов, вносимых оптическим передатчиком, на выходе фотодетектора оптического приемника	24
2.1.3 Расчет составляющей шума, обусловленной наличием волоконно-оптического усилителя типа EDFA, на выходе фотодетектора оптического приемника	25
2.1.4 Расчет собственных шумов оптического приемника	26
2.1.5 Расчет результирующего отношения сигнал/шум	27
2.1.6 Расчет вероятности ошибки в групповом электрическом сигнале	27
2.2 Анализ защищенности от собственных шумов в гибридных сетях кабельного цифрового телевидения	33
2.3 Анализ основных способов оптимизации параметров распределительных сетей цифрового кабельного телевидения	41
2.3.1 Подбор стандартов передачи телевизионных сигналов по кабельным сетям	42

2.3.2 Варьирование методами передачи сигналов цифрового спутникового телевидения по кабельным сетям.....	45
2.3.3 Оптимальная интеграция цифровых головных станций в существующую общегородскую телефонную волоконно-оптическую сеть.....	51
Глава 3 Структурно-параметрическая оптимизация пассивных волоконно-оптических сетей PON	56
Глава 4 Анализ эффективности методов защиты информации, передаваемой по пассивным волоконно-оптическим сетям PON.....	67
4.1 Разработка обобщенной модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON	67
4.1.1 Определение угроз информации, характерных для пассивных волоконно-оптических сетей PON	68
4.1.2 Выделение основных этапов сценария атаки на пассивные волоконно-оптические сети PON	69
4.1.3 Нарушение конфиденциальности в сетях PON: классификация механизмов реализации и защиты	70
4.1.4 Нарушение доступности в сетях PON: определение и анализ живучести абонентских сетей доступа PON	77
4.1.5 Нарушение достоверности в сетях PON: анализ и классификация криптографических методов защиты	82
4.1.6 Блок-схема модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON	87
4.2 Разработка алгоритма расчета экономической эффективности защиты информации в сетях PON	89
Заключение	94
Перечень условных обозначений	96
Литература	98

ВВЕДЕНИЕ

Информационные технологии (в частности телевидение) давно занимают важнейшее место в повседневной жизни. Удовлетворение возрастающего спроса населения на технически качественное телевидение является комплексной задачей. Наряду с бурным развитием спутниковых телевизионных проектов, строительством мощных передающих телецентров и ретрансляционных линий передач в решении указанной задачи свою весьма обширную нишу занимает строительство сетей кабельного телевидения.

Во-первых, создание сетей кабельного телевидения является экономически привлекательным (возможность объединения достаточно удаленных и различных по плотности населения районов в крупные пользовательские сети с интеграцией услуг «Интернет-телевидение-телефония», формированием различных пакетов услуг с дифференциацией абонентской платы и т. д.).

Во-вторых, сети кабельного телевидения с успехом решают задачу обеспечения огромного числа абонентов качественным телевизионным сигналом в условиях плотной и разновысотной городской застройки, где условия приема эфирного телевидения не всегда приемлемы, а непосредственный прием спутникового вещания не всегда выгоден пользователям с финансовой точки зрения.

В настоящее время все более широкое распространение в качестве абонентской «последней мили» получают сети FTTH («волокно до квартиры»), организованные по технологии пассивных оптических сетей PON. Такие сети предлагают абонентам не только услуги телефонии, доступа в Интернет, IPTV (сигналы передаются на длине волны 1490 нм для прямого потока к абоненту и 1310 нм для обратного потока от абонента), но и передачу широкоэмительных программ цифрового кабельного телевидения (используется длина волны 1550 нм) [70, 75].

Однако типовые технические решения по предоставлению телекоммуникационных услуг с применением оптического доступа FTTH на базе технологии

пассивных оптических сетей (например [22, 23, 75]) содержат только примеры расчета оптического бюджета мощности, когда возможная длина оптического тракта ограничивается лишь затуханием по мощности. Это справедливо при рассмотрении услуг передачи данных и телефонии с применением простых бинарных кодов типа NRZ. Но при передаче широковещательных программ цифрового кабельного телевидения по стандарту DVB-C/C2 используются более сложные виды модуляции (в частности квадратурно-амплитудная модуляция QAM).

Одним из нормируемых параметров при построении таких сетей является вероятность ошибки, которая зависит от отношения мощностей полезного сигнала и шума. Именно значение отношения сигнал/шум и может стать критическим фактором при построении распределительных сетей цифрового кабельного телевидения. В работах современных ученых в области оптических телекоммуникаций (например [12, 21, 50, 68, 76]) этот вопрос учтен не в полной мере.

Отсутствие четкой методики расчета жизнеспособности волоконно-оптических и гибридных волоконно-коаксиальных сетей кабельного цифрового телевидения, основанной на анализе защищенности от собственных шумов, не позволяет провести классификацию возможных направлений изменения параметров сети (и ее оптимизации) для соответствия принятым нормам.

В настоящее время к абонентским сетям доступа (особенно корпоративным) предъявляются повышенные требования к эффективности функционирования (например, увеличение скорости обработки информации, подключение удаленных на значительное расстояние абонентов и т. п.) при условии сохранения качества и надежности передачи информации. Поэтому перспективными являются направления оптимизации волоконно-оптических абонентских сетей доступа по вышеперечисленным параметрам с учетом преимуществ и недостатков различных концепций.

При этом интерес представляют как разработки отечественных авторов (например [9, 10, 45]) в направлении перехода к сетям PON с волновым мультимедийным доступом.

типлексированием и звездообразной топологией, так и публикации последних лет зарубежных авторов (например [83–85]), сконцентрированные в основном на использовании в пассивных оптических абонентских сетях высокоскоростного множественного доступа с кодовым разделением каналов.

Не менее актуальным является вопрос о защите информации, передаваемой по пассивным волоконно-оптическим сетям PON. Если в самом начале своего использования интерактивные волоконно-оптические линии связи считались неуязвимыми с точки зрения информационной безопасности, то в настоящее время известны определенные способы, позволяющие злоумышленнику «перехватывать» конфиденциальную информацию: секретную правительственную, служебную и личную, финансовую или медицинскую.

В известных учебных пособиях (например [13, 50, 78, 79]) и опубликованных за последние годы научных статьях (например [6, 16, 17, 46, 53]) отсутствуют комплексный подход, систематизация сведений и выделение особенностей, касающихся именно пассивных оптических сетей.

Таким образом, настоящее пособие посвящено подробному рассмотрению заявленных выше вопросов, а именно: проблеме повышения эффективности сетей цифрового кабельного телевидения путем оптимизации структуры построения и обоснования параметров сети, обеспечивающих требуемое отношение сигнал/шум и вероятность ошибок; рекомендациям построения сети с учетом эффективной защиты передаваемой информации от разных вариантов атак злоумышленника.

Авторы благодарят рецензентов учебно-методического пособия: начальника кафедры связи УО «Военная академия Республики Беларусь», кандидата технических наук, полковника Е. В. Машкина, доцента кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета, кандидата технических наук М. В. Комара, а также кандидата технических наук, полковника кафедры связи УО «Военная академия Республики Беларусь» А. А. Пилюшко за полезные замечания, сделанные ими при рецензировании работы.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕТЯХ КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ И ИХ РАЗВИТИИ

1.1 Коаксиальные сети кабельного телевидения: основные понятия, причины перехода к цифровому формату и волоконно-оптическим линиям передачи

Сети кабельного телевидения представляют собой ту часть общегосударственных сетей распределения программ телевизионного вещания (а также иногда и радиовещания), в которой телевизионные сигналы распространяются посредством высокочастотных сигналов, передаваемых через проложенный к потребителю кабель. По сравнению с эфирным кабельное телевидение имеет ряд преимуществ: более высокое качество сигнала, высокая помехозащищенность, отсутствие проблем с передачей сигнала в городах с плотной разноуровневой многоэтажной застройкой, возможность интеграции различных услуг и др. [39].

Сети кабельного телевидения начали активно развиваться в Европе и США в 1980-х годах, в России и Беларуси первые кабельные сети появились в конце 1980-х – начале 1990-х годов. Долгое время основой кабельных телевизионных сетей являлся коаксиальный кабель. Радиус обслуживания одной системы кабельного телевидения, как правило, не превышал 10 км, а число абонентов – 10 тыс. Наряду с распределением республиканских телевизионных программ сети кабельного телевидения могут обеспечить подачу своим абонентам программ от местных студий, создаваемых специально для систем кабельного телевидения, а также программ, передаваемых с видеомагнитофонов и установок телекино.

Наибольшее распространение получили коаксиальные системы телевидения, которые строятся по стандартной древовидной схеме: головная станция – магистральная сеть – субмагистральная сеть – домовая распределительная сеть.

На головной станции осуществляется «эфирный» прием радиосигналов программ, передаваемых телевизионными радиопередатчиками и ретрансляторами в диапазоне метровых (МВ) и дециметровых (ДМВ) волн, а также программ, передаваемых по радиорелейным и спутниковым линиям связи. На эту же головную станцию могут поступать телевизионные программы по кабельным линиям связи или из местных студий.

С помощью оборудования, установленного на головной станции, осуществляется обработка входных радиосигналов изображения и передача их, как правило, в I, II и III частотных диапазонах [40]. Вместе с ними передаются радиосигналы УКВ ЧМ-вещания в диапазонах 66–73 МГц и 100–108 МГц.

В кабельной сети допускается использование специальных телевизионных каналов СК1–СК8 в диапазоне от 110 до 174 МГц и СК11–СК18 в диапазоне от 230 до 294 МГц.

Для обратной передачи внутрисистемных сигналов на головную станцию может использоваться диапазон частот примерно от 5 до 30 МГц.

Эфирные радиосигналы изображения, принимаемые в IV–V диапазонах, на головной станции, как правило, преобразуются в радиосигналы свободных каналов I–III диапазонов. Также при необходимости радиосигналы изображения, принимаемые в каналах I–III диапазонов, могут преобразовываться в радиосигналы других каналов этих диапазонов [39].

С выхода головной станции групповой сигнал, содержащий радиосигналы нескольких телевизионных программ, поступает в магистральную сеть, образованную совокупностью участков магистральных линий, усилителей, разветвителей и ответвителей. Усилители включаются через каждые 300–500 м и обеспечивают компенсацию затухания и выравнивание амплитудно-частотной характеристики прилегающего участка кабеля (в последних разработках в полосе до 860 МГц). Ответвитель отводит часть энергии радиосигналов из линии в одну или несколько ответвленных линий. Разветвитель делит на равные части энергию радиосигналов для распределения по нескольким направлениям. С их

помощью сигналы распределяются в субмагистральные сети, содержащие участки кабеля, широкополосные усилители и разветвители. В большинстве случаев кабели и усилители субмагистральной и магистральной сетей совпадают по своим параметрам [39].

Домовая распределительная сеть состоит из одного или нескольких домашних усилителей, разветвителей, направленных ответвителей, отрезков коаксиальных кабелей, абонентских линий и розеток, к которым подключаются индивидуальные теле- и радиоприемники.

Основными техническими проблемами, возникающими при реализации коаксиальных сетей кабельного телевидения, являются обеспечение высокой линейности амплитудных характеристик широкополосных усилителей, высокой равномерности частотных характеристик тракта передачи и низкого шум-фактора усилителей, высококачественного согласования элементов системы с коаксиальным кабелем и т. п. С этой целью, например, отдельные типы субмагистральных усилителей снабжаются автоматическими регуляторами (корректорами) усиления, которые компенсируют температурную нестабильность затухания сигналов в кабеле. Работа автоматических регуляторов усиления осуществляется с помощью одного или двух пилот-сигналов, передаваемых на определенных контрольных частотах, например 110 и 235 МГц, которые вводятся в групповой сигнал на головной станции. По магистральным линиям осуществляется также дистанционная подача питающего напряжения для усилителей.

С блок-схемами, описанием работы и основными параметрами ключевых элементов кабельных систем телевидения на коаксиальном кабеле (головной станции, конверторов головной станции, магистральных и домашних усилителей) можно ознакомиться в [12, 21, 39, 40].

Качественные показатели системы кабельного телевидения оцениваются набором объективных электрических параметров, измеряемых на входе абонентской линии или непосредственно в абонентской розетке (см. [39] таблица 59), а также субъективных показателей, основанных на визуальном контроле

качества изображения на экране контрольного телевизора. В частности, при использовании 5-балльной шкалы качества и распределения в системе кабельного телевидения сигналов эфирного телевидения среднеарифметические оценки (для группы экспертов) в магистральной и субмагистральной сети должны быть не хуже 4 баллов, а в домовой – 3,5. Если же все испытания проводятся при подаче на вход головной станции сигнала непосредственно от испытательного генератора, то качество наблюдаемого при этом изображения должно иметь оценку соответственно 5 и 4,5 балла [39].

При использовании типовых телевизоров в домовой распределительной сети теоретически число телевизионных программ, передаваемых по системе кабельного телевидения в диапазоне МВ, не превышает 12, практически же оно будет равно 5-6. Это объясняется тем, что из-за недостаточной избирательности приемников по соседним каналам приходится чередовать «рабочие» и «нерабочие» каналы. Если же конвертирование эфирных каналов и модуляция видеопрограмм осуществляется не только в стандартные частотные диапазоны МВ (I, II, III), но также и в специальные (110–174 и 230–300 МГц), то это существенно расширяет возможности системы кабельного телевидения и позволяет довести число распределяемых телевизионных программ до 12 [39].

Конвертирование каналов в головной станции производится, как правило, при эфирном приеме каналов диапазона ДМВ, для телевизионных каналов диапазона МВ оно осуществляется в случаях:

а) когда напряженность поля эфирного канала настолько велика, что наводимый при этом непосредственно на вход телевизора сигнал по своему уровню отличается меньше чем на 30 дБ от сигнала этого канала, передаваемого по системе кабельного телевидения;

б) когда «эфирный» канал оказывается смежным с каким-либо из конвертируемых каналов;

в) когда в полосу частот данного канала попадает частота гетеродина какого-либо конвертируемого канала.

В первом случае на экране телевизора образуется видимое на глаз опережающее или запаздывающее повторное изображение той же телевизионной программы. Во втором – из-за недостаточной избирательности телевизионного приемника по соседним каналам приема в звуковом канале прослушивается звуковое сопровождение соседнего канала, а в яркостном канале возникает помеха со средней частотой порядка 1,5 МГц. В третьем случае в яркостном канале образуется высокочастотная помеха, частота которой равна разности несущей частоты данного канала и частоты гетеродина конвертируемого канала [39].

Описанные выше системы кабельного телевидения, выполняемые первоначально на основе коаксиальных линий связи и использующие аналоговые виды модуляции, обеспечивали централизованное распределение большим группам абонентов определенного числа телевизионных и звуковых программ вещания. Но с течением времени выявился ряд присущих им недостатков: громоздкость магистральной распределительной сети, большое число ретрансляторов, трудности прокладки и эксплуатации, ограниченность набора информационных услуг и т. д. [39].

Поэтому в настоящее время повсеместное распространение получают системы кабельного телевидения, в которых используются цифровые способы передачи телевизионных программ на основе или исключительно волоконно-оптических линий связи (с пассивными волоконно-оптическими сетями PON в качестве абонентской «последней мили»), или гибридных волоконно-коаксиальных линий связи [22, 23, 75].

1.2 Общие сведения о волоконно-оптических линиях связи

Волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) – это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием «оптическое волокно». Волоконно-оптическая

сеть – это информационная сеть, в которой связующими элементами между узлами являются волоконно-оптические линии связи [76].

Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий связи является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне: широкая полоса пропускания (возможность передачи по одному оптическому волокну потока информации в несколько терабит в секунду), малое затухание светового сигнала в волокне; низкий уровень шумов; высокая помехозащищенность; меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность; экономичность (волокно изготовлено из недорогого материала – кварца); длительный срок эксплуатации [68, 70].

Среди основных компонентов ВОЛС выделяют:

1. Оптический передатчик, который обеспечивает преобразование входного электрического (цифрового или аналогового) сигнала в выходной световой (цифровой или аналоговый) сигнал [76].

2. Оптический приемник, который, в свою очередь, осуществляет обратное преобразование входных оптических импульсов в выходные импульсы электрического тока [70, 73].

3. Волоконно-оптический усилитель, который, используя специальные активные среды и лазеры накачки, непосредственно усиливает проходящий оптический сигнал благодаря индуцированному излучению [8]. Такой усилитель не наделен функциями восстановления сигнала и в этом уступает электронным повторителям/регенераторам. Однако качество сигналов, передаваемых по оптическому волокну, даже если сегмент протяженный, остается достаточно высоким вследствие малой дисперсии и затухания, при этом уровень вносимых шумов из-за влияния электромагнитного излучения невелик [49]. Также оптический усилитель является более универсальным устройством, поскольку в отличие от регенератора не привязан к стандарту передаваемого сигнала или определенной частоте модуляции. Именно поэтому ретрансляция передаваемых

по ВОЛС данных с помощью простого усиления без полной регенерации является весьма эффективной [49, 77].

В настоящее время переход к волоконно-оптическим сетям связи осуществляется на всех ступенях: на магистральных линиях, в городских сетях и абонентских сетях доступа [34, 70].

1.3 Особенности пассивных волоконно-оптических линий связи PON

Абонентские сети доступа, построенные исключительно на основе ВОЛС и исходя из принципов своей организации, получили название «пассивные оптические линии связи» (PON) [70].

Основной целью внедрения технологии PON является предоставление абонентам современных телекоммуникационных услуг путем построения качественно новой широкополосной сети доступа [70, 76].

Данная сеть должна обеспечить прозрачный транспорт для всего комплекса предоставляемых услуг – телефонии, широкополосного доступа к сети передачи данных и кабельного телевидения. В то же время данная сеть должна иметь наиболее экономичную с точки зрения объема линейных сооружений оптоволоконную инфраструктуру.

Основная идея архитектуры PON – использование всего одного приемопередающего модуля (оптического линейного терминала OLT) для передачи информации множеству абонентских устройств (ONT) и приема информации от них (с использованием топологий «дерево» или «точка – много точек») [22, 23]. Число абонентских узлов, подключенных к одному приемопередающему модулю OLT, может быть настолько большим, насколько это позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемопередающей аппаратуры [75, 88].

Для передачи прямого (нисходящего) потока информации от OLT к ONT используется длина волны 1490 нм. Потoki данных от абонентских узлов в центральный узел, которые совместно образуют обратный (восходящий) поток, передаются на длине волны 1310 нм. В OLT и ONT встроены оптические мульт

типлексо́ры (WDM), разделяющие исходящие и входящие потоки в зависимости от длины волны [75].

Прямой поток на уровне оптических сигналов является широкополосным. Каждый абонентский терминал ONT, обрабатывая прямой поток информации и читая адресные поля, выделяет из этого общего потока предназначенную только ему часть информации [70, 75].

Как правило, все абонентские узлы ONT ведут передачу в обратном потоке на одной и той же длине волны, используя концепцию множественного доступа с временным разделением TDM. Для того чтобы исключить возможность пересечения (наложения) сигналов от разных ONT, для каждого из них устанавливается свое индивидуальное расписание (временной интервал) по передаче данных с учетом поправки на задержку, которая связана с удалением данного ONT от OLT [14]. Подробнее об особенностях построения сетей PON см. в подразделе 2.1.1.

При построении оптической распределительной сети, как правило, используется двухкаскадная схема деления оптического сигнала с помощью пассивных разветвителей (сплиттеров) $1 \times N$, где N – количество выходов сплиттера (то есть возможное количество подключаемых абонентов) [70, 76].

В качестве первого уровня обычно устанавливается пассивный оптический сплиттер с коэффициентом деления 1:2. В подъезде жилого дома в вандалозащищенных оптических распределительных шкафах устанавливается оптический сплиттер с коэффициентом деления 1:32, который обеспечивает создание оптической разветвленной древовидной архитектуры по дому [22, 23].

Для многоквартирных домов и домов с малым количеством абонентов допускается применение других вариантов схем деления оптического сигнала, например: 1:4 – первый уровень, 1:16 – второй уровень либо 1:8 – первый уровень, 1:8 – второй уровень деления оптического сигнала и др. [75].

Подключение абонентов непосредственно в жилых помещениях (квартирах) осуществляется с помощью оптического кабеля [22, 23, 75].

1.4 Особенности современных сетей кабельного телевидения

Сети кабельного телевидения (СКТВ) являются широко распространенным средством доставки телевизионных программ к абоненту. В условиях многоэтажной городской застройки они обеспечивают значительно лучшее качество телевизионного сигнала, чем эфирное вещание [21, 34, 52].

Широкое развитие волоконно-оптических технологий позволило использовать в качестве магистрального оптический кабель и объединить достаточно удаленные районы в крупные единые сети, охватывающие десятки и сотни тысяч абонентов [68].

Второй важной особенностью современного поколения СКТВ является наличие обратного, или «восходящего», канала (относительно низкоскоростного канала от абонента к головной станции, используемого кабельным оператором для диагностирования и мониторинга состояния сети, а также для предоставления широкого спектра дополнительных услуг: телефонии, передачи данных, доступа в Интернет и других интерактивных приложений) [52].

Постепенное внедрение цифрового телевидения в сетях КТВ ставит вопрос об их пригодности для этой цели и об оценке необходимых усовершенствований и доработок [12, 21, 52].

Повсеместное внедрение цифрового кабельного телевидения неизбежно: благодаря цифровому телевидению зритель получает возможность принимать больше телевизионных программ в тех же частотных каналах. В одном стандартном телевизионном радиоканале в полосе частот 6–8 МГц можно разместить до 8 телевизионных программ в цифровом формате (используется многоуровневая квадратурно-амплитудная модуляция QAM), то есть даже очень загруженная аналоговая сеть с 40–48 активными каналами переходит в категорию сетей с 5–6 занятыми каналами, в которых проблемы взаимных помех не столь актуальны [15]. Предварительный анализ применимости цифровых методов кодирования и модуляции показывает, что для цифрового стандарта кабельного

телевидения DVB-C отношение сигнал/шум (ОСШ) составляет всего 36 дБ (для аналогового телевидения эта величина должна быть не меньше 43 дБ) [39, 40].

Второе важное преимущество цифрового метода передачи цифровых сигналов – значительно лучшее субъективное качество изображения, приближающееся к качеству киноплёнки. На нем практически отсутствуют свойственные аналоговому телевидению шумы, импульсные помехи в виде ярких «звездочек», муар на изображении, цветовые «факелы» на переходах яркости.

Благодаря отдельной передаче сигналов яркости и цветности исключаются перекрестные искажения «яркость – цветность», достигается высокая разрешающая способность.

Качество воспроизводимого изображения практически не зависит от среды распространения сигнала и определяется только совершенством аппаратуры. Современные цифровые стандарты поддерживают формат изображения 16:9, что также приближает телевидение к кинематографу [21, 52].

Многие годы в телевидении, в отличие от кинематографа, не уделялось должного внимания звуковому сопровождению. Новые цифровые стандарты предлагают широкий спектр возможностей выбора вида звукового сопровождения – от монофонического до многоканального панорамного [52].

Универсальный характер цифровой передачи позволяет передавать однотипным образом в одном цифровом потоке не только сигналы изображения и звукового сопровождения, но и большой объем дополнительных данных: сервисную информацию вещателя, электронный путеводитель по программам, телетекст, субтитры, звуковое сопровождение на других языках, прогноз погоды, другую справочную информацию [12, 21].

Сигналы цифрового кабельного телевидения в формате DVB-C также передают в сетях PON, используя для этого третью длину волны в 1550 нм. Формирование группового сигнала производится на головной станции путем получения сигнала с телекоммуникационных спутников или по наземным сетям [15]. Групповой высокочастотный телевизионный сигнал через оптический пе-

редатчик подается по отдельной волоконно-оптической линии связи и доводится до места расположения OLT [12, 39].

На центральном узле устанавливается усилитель сигнала кабельного телевидения и волновой мультиплексор WDM для введения телевизионного оптического сигнала в волокно.

У абонента устанавливается ONT со стандартным антенным выходом, от которого сигнал кабельного телевидения подается по коаксиальному кабелю к телевизионному приемнику [75].

Более детально принципы формирования и прохождения группового телевизионного сигнала рассмотрены в главе 2.

Библиотека БГУИР

ГЛАВА 2

АНАЛИЗ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ГИБРИДНЫХ СЕТЕЙ ЦИФРОВОГО КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

2.1 Анализ защищенности от собственных шумов в волоконно-оптических сетях цифрового кабельного телевидения

2.1.1 Типовая структура пассивной волоконно-оптической сети цифрового кабельного телевидения

Пример типовой функциональной схемы сети FTTH, организованной по технологии PON, представлен на рисунке 2.1 [41, 75].

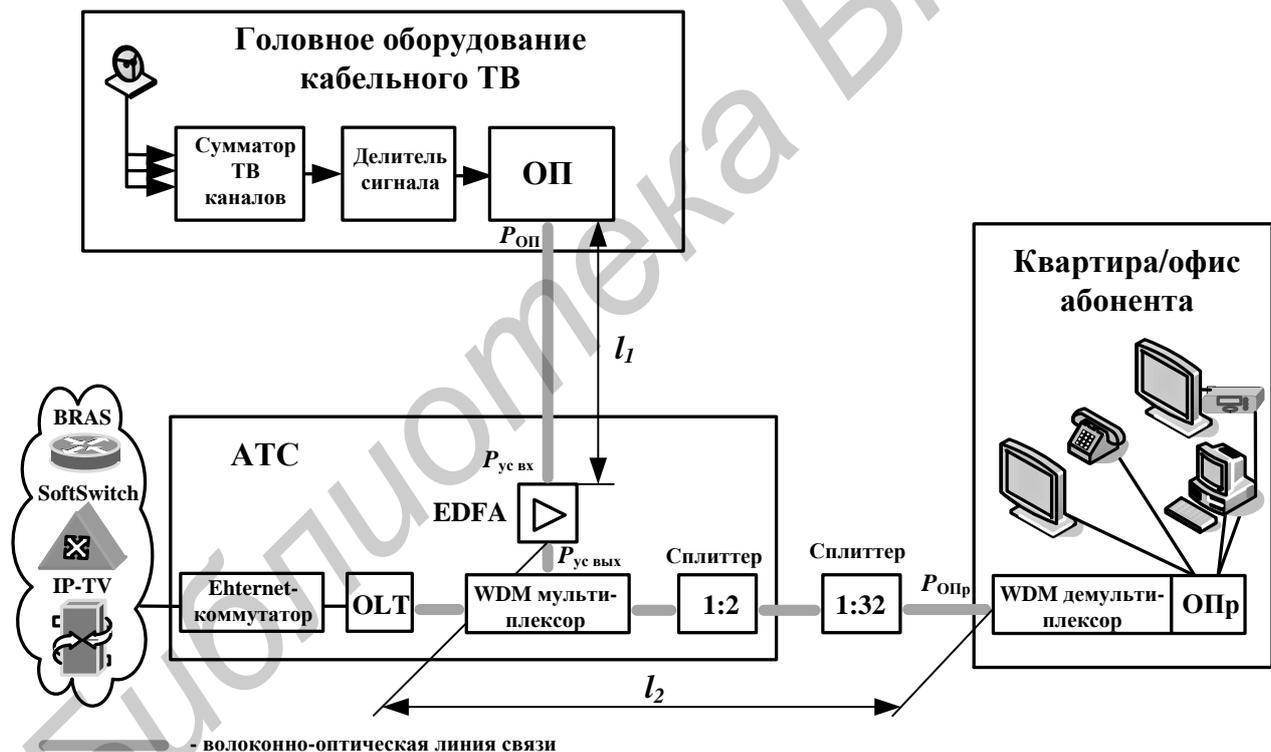


Рисунок 2.1 – Типовая схема сети FTTH по технологии PON

Под головным оборудованием (ГО) понимается совокупность электронных средств, предназначенных для формирования качественного группового телевизионного сигнала, состоящего из широкого набора аналоговых и цифровых

сигналов с разными форматами модуляции и предназначенного для его дальнейшего распределения по сети кабельного телевидения. В состав ГО обычно входят первичные внешние устройства, предназначенные для формирования исходного сигнала (антенные устройства, видеоманитофоны, внешние сетевые интерфейсы и т. п.), собственно сама головная станция или головная система (ГС), выходные суммирующие устройства (сумматоры, усилители и т. п.), оптическое оборудование и другие вспомогательные устройства, конфигурация которых зависит от конкретных условий эксплуатации системы кабельного телевидения [25, 61].

Обобщенная структурная схема цифрового ГО приведена на рисунке 2.2 [25, 61]. Цифровой радиосигнал, сформированный по стандарту DVB-S (спутниковое телевидение), принимается спутниковой антенной SAT, среди наиболее важных элементов которой можно выделить:

а) облучатель 1 (от него зависят такие параметры, как коэффициент использования поверхности зеркала, шумовая температура, коэффициент усиления [12]);

б) поляризатор 2 (обеспечивает возможность преобразования поляризованных определенным образом электромагнитных волн в сигнал с требуемой для конвертера линейной поляризацией [71]);

в) малошумящий конвертер LNB 3 (Low Noise Blockconverter) [71].

Конвертер обеспечивает необходимое усиление при минимально возможном уровне шумов и преобразует частоту принимаемого сигнала из Ku-диапазона (10 700–12 750 МГц) или C-диапазона (3400–4200 МГц) в промежуточную область (от 950 до 2150 МГц), называемую L-диапазоном, с целью дальнейшей передачи с наименьшими потерями по коаксиальному кабелю [12].

Далее через усилитель промежуточной частоты 4 сигнал подается непосредственно на цифровую ГС, где происходит его дальнейшая обработка.



Рисунок 2.2 – Обобщенная структурная схема цифрового ГО

Головную станцию для вещания в цифровом формате MPEG-2 DVB можно построить путем непосредственного транскодирования из одного вида модуляции в другую (например, из квадратурно-фазовой модуляции QPSK в квадратурно-амплитудную QAM). В настоящее время существует много производителей таких головных станций, использующих недорогие и хорошие модульные решения для их построения. Эти решения основаны на том, что входной QPSK-модулированный сигнал со спутника, содержащий пакет программ, декодируется демодулятором QPSK 6 до транспортного потока MPEG-2 DVB, а затем этот поток модулируется с использованием QAM-модулятора 7 в диапазоне метровых и дециметровых волн МВ/ДМВ [61]. Полученный цифровой транспортный поток подается через сумматор 8 в распределительную сеть, в результате чего абонент получает комплект услуг, аналогичный спутниковым, но уже на стандартных несущих частотах (как для наземного телевидения) только без антенны (см. ветвь А на рисунке 2.2).

Существует и другой вариант построения цифровых головных станций, когда в кабельную абонентскую сеть передается пакет программ, сформированный на самой станции. В этом случае программы принимаются профессиональными приемниками-декодерами 9 и декодируются в аналоговый формат (при необходимости подмешиваются программы местных телестудий, убираются нежелательные программы из первоначального спутникового

пакета), а далее все входные сигналы подаются на видеокодеры 10 для кодирования выбранной программы в стандартный цифровой формат [25, 61] (см. ветвь Б на рисунке 2.2). Преимущество подобной системы очевидно – абонент получает наиболее оптимальный по содержанию пакет услуг. Однако эта система является относительно дорогостоящей, так как для кодирования каждой программы необходим профессиональный видеокодер MPEG-2.

Таким образом, как видно из рисунка 2.2, из-за декодирования принимаемого сигнала в формате QPSK до уровня MPEG-2 и последующего QAM-модулирования сигнала (при этом обязательно используется коррекция кода Рида – Соломона) выходной сигнал после цифровой ГС можно считать полностью восстановленным и незашумленным [25, 32].

Вернемся к рассмотрению рисунка 2.1. Сигнал цифрового телевидения с выхода цифровой ГС передается оптическим передатчиком (ОП), установленным на головной станции кабельного телевидения, по волоконно-оптической линии связи, где происходит его затухание. Для усиления сигнала перед его распространением непосредственно по «дереву PON» установлен волоконно-оптический усилитель (БОУ). После БОУ на автоматической телефонной станции (АТС) с помощью WDM-мультиплексора объединяют телевизионные сигналы, передающиеся на одной длине волны $\lambda_1 = 1550$ нм, и данные (Интернет, телефония и др.), передающиеся по сети FTTH от OLT (оптический линейный терминал) на другой длине волны $\lambda_2 = 1490$ нм. Далее групповой оптический сигнал проходит по оптической линии, разветвляясь по «дереву PON» с помощью пассивных устройств – сплиттеров. Приемником сигнала (ОПр) является оптический сетевой терминал (ONT) со встроенным WDM-демультиплексором, установленный у каждого абонента [41].

Поскольку оптическое волокно изготавливается из диэлектрического материала, оно невосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медных кабельных систем и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередач, электро-

двигательные установки и т. д.). Также в многоволоконных кабелях не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитных излучений, присущей многопарным медным кабелям [68]. Поэтому при расчете телевизионной системы в качестве источников шумов рассматривают активные устройства системы: ОП – ВОУ – ОПр [31]. Далее рассмотрим обобщенную методику расчета вероятности ошибки и приведем пример для конкретной сети доступа.

При расчете шумов, вносимых любым из активных устройств системы, а также при расчете отношения сигнал/шум необходимо «пересчитать» мощности шумов от всех активных устройств и мощность полезного сигнала к одной и той же точке сети доступа – выходу фотодетектора оптического приемника. Для наглядности на рисунке 2.3 приведена блок-схема типовой волоконно-оптической сети цифрового кабельного телевидения с соответствующей ей диаграммой уровней (все буквенные обозначения уровней мощности и длин волоконно-оптического тракта соответствуют обозначениям, используемым в данном учебно-методическом пособии).

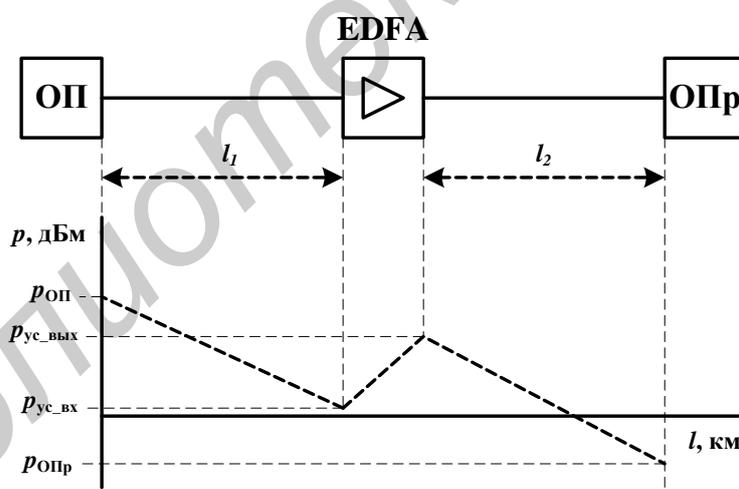


Рисунок 2.3 – Диаграмма уровней волоконно-оптической сети

Требуемый уровень оптической мощности на входе фотодетектора ОПр $P_{\text{ОПр}}$ можно рассчитать из следующего выражения [38, 63, 88]:

$$P_{\text{ОПр}} = 10 \lg(P_{\text{ОП}}/1 \text{ мВт}) - a_1 + g - a_2, \text{ дБм}, \quad (2.1)$$

где $P_{\text{ОП}}$ – оптическая мощность на выходе оптического передатчика ОП, мВт;

$g = 10 \lg G$ – усиление волоконно-оптического усилителя, дБ,

G – коэффициент усиления волоконно-оптического усилителя по мощности (в разгах);

a_1, a_2 – затухания участков ОП – ВОУ и ВОУ – ОПр соответственно, дБ, которые рассчитываются по общей формуле [22, 23, 41]:

$$a = \alpha(\lambda)l + a_p n_p + a_{np} n_{np} + a_{сп} n_{сп} + a_{зап}, \quad (2.2)$$

где $\alpha(\lambda)$ – коэффициент затухания кабеля на рабочей длине волны λ , дБ/км;

l – длина оптоволоконного тракта выбранного участка;

a_p – затухание разъемных соединителей (сплайсов) на этом участке, дБ;

n_p – количество разъемных соединителей;

a_{np} – затухание неразъемных (сварных) соединителей, дБ;

n_{np} – количество неразъемных соединителей;

$a_{сп}$ – затухание сплиттеров, установленных перед ОПр, дБ;

$n_{сп}$ – количество сплиттеров;

$a_{зап}$ – запас на ремонт линии/старение кабеля (можно принять $a_{зап} = 1-2$ дБ на каждом участке).

2.1.2 Расчет шумов, вносимых оптическим передатчиком, на выходе фотодетектора оптического приемника

В оптическом передатчике возможны различные шумовые явления, которые приводят к флуктуациям средней оптической мощности. Их оценивают косвенным параметром RIN , называемым относительной спектральной плотностью шума [12]. Смысл этого параметра заключается в следующем. Пусть $P_{ОПр}$ – средняя оптическая мощность, которая подвержена флуктуациям. Эти флуктуации вызывают в идеальном нешумящем фотодиоде, условно подключенном к выходу ОП, шум с мощностью $P_{ш. ОП}$. Параметр RIN показывает отношение удельной мощности шума передатчика к средней мощности фототока P_ϕ и удобно пересчитывается к выходу оптического приемника ОПр [26, 38]:

$$RIN = (P_{ш. ОП} / \Delta f) / P_\phi = (P_{ш. ОП} / \Delta f) / ((rP_{ОПр})^2 R_n), \quad (2.3)$$

где $P_{ш.оп}$ – электрическая мощность шума оптического передатчика ОП, выделяющегося в нагрузке фотодиода ОПр;

P_{ϕ} – средняя мощность группового электрического сигнала в нагрузке фотодиода ОПр;

Δf – шумовая полоса оптического приемника;

R_n – сопротивление нагрузки фотодиода;

r – чувствительность фотодиода, определяемая выражением [12]

$$r = I_{\phi} / P_{опр} = \eta e / (h \nu), \quad (2.4)$$

где I_{ϕ} – средний ток, протекающий через нагрузку фотодиода ОПр;

$P_{опр}$ – средняя оптическая мощность, падающая на фотодиод ОПр;

η – квантовая эффективность фотодетектора;

e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

h – постоянная Планка, равная $6,6252 \cdot 10^{-34}$ Вт·с²;

ν – частота оптического сигнала, соответствующая выбранной длине волны

λ ($\nu = c/\lambda$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме).

По известным параметрам оптического передатчика RIN , чувствительности фотодиода ОПр и средней оптической мощности на входе оптического приемника $P_{опр}$, входящим в перечень паспортных данных на эти устройства [75], можно рассчитать мощность составляющей шума на выходе фотодетектора, которая создается за счет шумовых процессов в оптическом передатчике [26]:

$$P_{ш.оп} = (r P_{опр})^2 \cdot RIN \cdot \Delta f \cdot R_n. \quad (2.5)$$

2.1.3 Расчет составляющей шума, обусловленной наличием волоконно-оптического усилителя типа EDFA, на выходе фотодетектора оптического приемника

Чаще всего для усиления телевизионных сигналов в волоконно-оптических сетях доступа используют усилители, построенные на основе активных волокон, легированных эрбием (EDFA). Они усиливают сигнал в диапазоне 1530–1565 нм [70, 73]. Основной источник шума в таких оптических усилителях –

усиленная спонтанная эмиссия сигнала (ASE). Ее вклад в шум приемника происходит не непосредственно, а за счет биений составляющих спонтанной эмиссии с усиливаемым сигналом. Мощность шума на выходе фотодетектора ОПР $P_{ш. ус}$, вызванного биениями между компонентами оптического сигнала и ASE, можно определить из следующего выражения [42, 70]:

$$P_{ш. ус} = 4\eta P_{ОПР} \eta P_{ОПР ASE} R_n, \quad (2.6)$$

где $P_{ОПР ASE}$ – мощность усиленной спонтанной эмиссии ASE, пересчитанная ко входу оптического приемника ОПР; остальные величины пояснялись ранее (в (2.3), (2.4)).

Если известна мощность усиленной спонтанной эмиссии ASE на выходе EDFA P_{ASE} , то, как следует из рисунка 2.3, на входе ОПР имеем $P_{ОПР ASE} = P_{ASE} \cdot 10^{-0,1a_2}$, где a_2 – затухание участка ВОУ – ОПР, дБ.

В свою очередь P_{ASE} рассчитывается по следующей формуле [49, 77]:

$$P_{ASE} = (NF \cdot G - 1)h\nu\Delta f, \quad (2.7)$$

где NF – шум-фактор волоконно-оптического усилителя.

Если ВОУ состоит из нескольких последовательно включенных оптических усилителей, то вместо (2.7) используется выражение [41, 70, 77]:

$$P_{ASE \text{ каск}} = [NF_1 G_1 G_2 \dots G_k + (NF_2 - 1)G_2 \dots G_k + \dots + (NF_k - 1)G_k - 1]h\nu\Delta f, \quad (2.8)$$

где k – число каскадов усилителя;

NF_j – шум-фактор j -го волоконно-оптического усилителя ($j = 1, 2, \dots k$);

G_j – коэффициент усиления j -го волоконно-оптического усилителя по мощности ($j = 1, 2, \dots k$).

2.1.4 Расчет собственных шумов оптического приемника

Шумы оптического приемника обусловлены дробовым квантовым шумом фотодетектора и тепловым шумом нагрузки фотодетектора [12]. В большинстве случаев в качестве фотодетекторов абонентских оптических приемников используют PIN-диоды, которые уступают лавинным фотодиодам (ЛФД) по чувствительности, зато имеют существенно более низкую стоимость, что является

неоспоримым преимуществом при построении сетей доступа с достаточно большим количеством абонентов [76].

Дробовый и тепловой шумы фотодетектора рассчитываются по формулам (2.9) и (2.10) соответственно [12, 70]:

$$P_{\text{ш. ОПр. др}} = 2erP_{\text{ОПр}} \Delta f R_{\text{н}} ; \quad (2.9)$$

$$P_{\text{ш. ОПр. т}} = kTNF_{\text{предус}} \Delta f , \quad (2.10)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура сопротивления нагрузки фотодетектора (резистора), К;

$NF_{\text{предус}}$ – шум-фактор электронного усилителя («предусилителя»), следующего непосредственно за фотодетектором.

2.1.5 Расчет результирующего отношения сигнал/шум

Этот расчет ведется с учетом некоррелированности шумов ОП, ВОУ и ОПр, пересчитанных на выход фотодетектора ОПр, по формуле [38, 41]:

$$P_c/P_{\text{ш}} = (rP_{\text{ОПр}}m)^2 R_{\text{н}} / (P_{\text{ш. ОП}} + P_{\text{ш. ус}} + P_{\text{ш. ОПр. др}} + P_{\text{ш. ОПр. т}}), \quad (2.11)$$

где m – индекс модуляции оптического сигнала по интенсивности;

$P_{\text{ш. ОП}}$, $P_{\text{ш. ус}}$, $P_{\text{ш. ОПр. др}}$ и $P_{\text{ш. ОПр. т}}$ – мощности шумов активных элементов системы, рассчитываемые по формулам (2.5), (2.6), (2.9) и (2.10) соответственно;

$P_{\text{ОПр}} = 10^{0,1p_{\text{ОПр}}}$, мВт, где $p_{\text{ОПр}}$ определяется из (2.1).

2.1.6 Расчет вероятности ошибки в групповом электрическом сигнале

Вероятность ошибки в s -м цифровом канале ($s = 1, 2, \dots, n$, где $n \approx 60$) при использовании многопозиционной одночастотной квадратурной модуляции M_s -QAM, которая, как правило, применяется в сетях цифрового кабельного телевидения, можно рассчитать по следующей формуле [34, 40, 87]:

$$p_{\text{ошс}} \approx \frac{2(1-L_s^{-1})}{\log_2 L_s} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{3P_{\text{сс}}/P_{\text{шс}}}{L_s^2 - 1}} \right], \quad (2.12)$$

где $Q(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-\frac{u^2}{2}) du$ – Гауссов интеграл ошибок (для упрощения

расчетов значения интеграла Гаусса табулированы, см. [34]);

L_s – число разрешенных значений уровней амплитуд в s -м цифровом канале ($L_s = \sqrt{M_s}$, где M_s – число позиций модуляции QAM-сигнала);

$P_{\text{сс}}/P_{\text{шс}}$ – отношение сигнал/шум в s -м цифровом канале.

Если в первом приближении принять, что на всех каналах применяют однотипные варианты QAM и используется «плотная упаковка» группового электрического сигнала, то можно полагать, что $P_{\text{сс}}/P_{\text{шс}} = \text{const} = P_{\text{с}}/P_{\text{ш}}$ из (2.11) и $L_s = \text{const} = L$ [38].

С учетом выражений (2.11) и (2.12) вероятность ошибки в групповом электрическом сигнале запишется в виде [41]

$$p_{\text{ош}} \approx \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{3(rP_{\text{опр}}m)^2 R_{\text{н}} / (P_{\text{ш.оп}} + P_{\text{ш.ус}} + P_{\text{ш.опр.др}} + P_{\text{ш.опр.т}})}{L^2 - 1}} \right]. \quad (2.13)$$

Для сетей цифрового кабельного телевидения вероятность ошибки является нормируемым параметром и подлежит обязательному расчету. По формулам (2.5), (2.6), (2.9), (2.10) производят расчет мощности шумов, вносимых активными устройствами сети, а также мощности полезного сигнала, пересчитанных на выход фотодетектора оптического приемника [31]. Затем рассчитывают отношение сигнал/шум (см. (2.11)) и вероятность ошибки (см. (2.13)) [41].

Максимально допустимым значением вероятности ошибки для сетей цифрового телевидения, при котором работают восстановительные механизмы помехоустойчивого кода Рида – Соломона, является величина $2 \cdot 10^{-4}$ [5, 52]. Если на входе декодера Рида – Соломона вероятность ошибки $2 \cdot 10^{-4}$ или ниже, то он снижает ее до 10^{-10} – 10^{-11} . Однако если вероятность ошибки выше, чем $2 \cdot 10^{-4}$, то изображение «разваливается» и не корректируется [5, 52].

Очевидно, что если полученная вероятность ошибки не удовлетворяет заданным нормам, то необходимо варьировать параметры волоконно-оптической сети доступа (коэффициент усиления усилителя, длину волоконно-оптической линии, тип используемых сплиттеров и т. п.). Для каждого варианта производят перерасчет вероятности ошибки. Необходимо обратить внимание на то, что расчет должен производиться для «самого худшего случая», то есть для абонента, максимально удаленного от оптического передатчика [31].

Приведем пример расчета для следующей системы: ОП – линия связи 1 – EDFA – линия связи 2 – ОПр. Характеристики всех устройств и волоконно-оптического кабеля приближены к реальным [22, 23, 75] (таблицы 2.1, 2.2).

Таблица 2.1 – Характеристики пассивных элементов системы [22, 23, 75]

Пассивные элементы	Затухание	Длина/количество
Участок линии ОПр – EDFA (общее затухание $a_1 = 6$ дБ с учетом $a_{зап}$)		
Волоконно-оптический тракт l_1	0,22 дБ/км	20 км
Неразъемные соединения	0,05 дБ	9 шт.
Оптические коннекторы	0,25 дБ	2 шт.
Участок линии EDFA – ОПр (общее затухание $a_2 = 27$ дБ с учетом $a_{зап}$)		
Волоконно-оптический тракт l_2	0,22 дБ/км	15 км
Неразъемные соединения	0,05 дБ	7 шт.
Оптические коннекторы	0,25 дБ	8 шт.
Сплиттер 1:2	3,0 дБ	1 шт.
Сплиттер 1:32	17,0 дБ	1 шт.

Таблица 2.2 – Характеристики активных элементов системы [22, 23, 75]

Параметр	Значение параметра
1	2
Уровень сигнала на выходе ОП $p_{ОП, вых}$, дБм	20
Уровень сигнала на входе EDFA $p_{ус, вх}$, дБм	14
Уровень сигнала на выходе EDFA $p_{ус, вых}$, дБм	20
Шум-фактор усилителя EDFA NF , отн. ед.	4
Уровень сигнала на входе ОПр $p_{ОПр}$, дБм	-7

Продолжение таблицы 2.2

1	2
Сопrotивление нагрузки фотодиода R_n , Ом	50
Квантовая эффективность η	0,6
Чувствительность фотодиода r , А/Вт	0,75
Относительная интенсивность шума ОП RIN , 1/Гц	10^{-15}
Шум-фактор предусилителя $NF_{\text{предус}}$, отн. ед.	4
Индекс оптической модуляции m	0,04
Шумовая полоса ОП Δf , МГц	800
Частота ν , соответствующая длине волны 1550 нм, Гц	$1,94 \cdot 10^{14}$

По формуле (2.5) определим шум, создаваемый оптическим передатчиком на выходе фотодетектора оптического приемника:

$$P_{\text{ш.оп}} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)})^2 \cdot 10^{-15} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,90 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = 0,90 \cdot 10^{-9} \text{ мВт}. \quad (2.14)$$

Примечание – При расчетах все величины сначала необходимо перевести из децибелов по мощности (дБм) в ватты с учетом общеизвестного соотношения $P \text{ (Вт)} = 0,001 \cdot 10^{0,1P \text{ (дБм)}}$. Например, уровень сигнала на входе ОП, составляющий -7 дБм согласно таблице 2.2, соответствует мощности следующим образом: $P_{\text{ОП}} = 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \text{ Вт} = 0,2 \text{ мВт}$ (см. выражение (2.14)).

Далее по формуле (2.7) рассчитаем мощность усиленной спонтанной эмиссии ASE на выходе EDFA:

$$P_{\text{ASE}} = (4 \cdot 4 - 1) \cdot 6,6252 \cdot 10^{-34} \cdot 1,94 \cdot 10^{14} \cdot 800 \cdot 10^6 = 1,53 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} = 1,53 \cdot 10^{-6} \text{ мВт}.$$

Мощность шума на выходе фотодетектора, обусловленную наличием BOU EDFA, определим по формуле (2.6):

$$P_{\text{ш.ус}} = 4 \cdot 0,6 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \cdot 0,6 \cdot 1,53 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-0,1 \cdot 27} \cdot 50 = 0,29 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} = 0,29 \cdot 10^{-10} \text{ мВт}.$$

Мощность дробового и теплового шумов фотодетектора рассчитаем по формулам (2.9) и (2.10) соответственно:

$$P_{ш. \text{ОПр. др}} = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,19 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} = 0,19 \cdot 10^{-8} \text{ мВт};$$

$$P_{ш. \text{ОПр. т}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 294 \cdot 4 \cdot 800 \cdot 10^6 = 0,81 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} = 0,81 \cdot 10^{-8} \text{ мВт}.$$

Определим мощность полезного сигнала на выходе ОПР и результирующее отношение сигнал/шум (см. формулу (2.11)):

$$P_c = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \cdot (0,04)^2 \cdot 50 = 0,18 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} = 0,18 \cdot 10^{-5} \text{ мВт};$$

$$P_c/P_{ш} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,90 \cdot 10^{-12} + 0,47 \cdot 10^{-13} + 0,19 \cdot 10^{-11} + 0,13 \cdot 10^{-10}) = 163,31 \text{ (22,13 дБ)}.$$

Для модуляции QAM-16 вероятность ошибки согласно формуле (2.13) определяется в виде

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{2(1 - 4^{-1})}{\log_2 4} \times$$

$$\times Q \left[\sqrt{\frac{3(0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,90 \cdot 10^{-12} + 0,29 \cdot 10^{-13} + 0,19 \cdot 10^{-11} + 0,81 \cdot 10^{-11})}{4^2 - 1}} \right] =$$

$$= 4,11 \cdot 10^{-9}.$$

Результаты полученных расчетов сведем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчетов основных параметров системы

Параметр	Значение параметра
Мощность шумов на выходе ОПР, создаваемых за счет шумовых процессов в ОП, $P_{ш. \text{ОП}}$, мВт (см. (2.5))	$0,90 \cdot 10^{-9}$
Мощность шума, вызванного биениями между компонентами оптического сигнала и ASE $P_{ш. \text{ус}}$, мВт (см. (2.6))	$0,29 \cdot 10^{-10}$
Мощность дробовых шумов ОПР $P_{ш. \text{ОПр. др}}$, мВт (см. (2.9))	$0,19 \cdot 10^{-8}$
Мощность тепловых шумов ОПР $P_{ш. \text{ОПр. т}}$, мВт (см. (2.10))	$0,81 \cdot 10^{-8}$
Мощность полезного сигнала на выходе ОПР P_c , мВт	$0,18 \cdot 10^{-5}$
Отношение сигнал/шум $P_c/P_{ш}$ (см. (2.11))	163,31 (22,13 дБ)
Вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$ для модуляции QAM-16 (см. (2.13))	$4,11 \cdot 10^{-9}$

Как видно из таблицы 2.3, для сети с выбранными по таблицам 2.1 и 2.2 параметрами отношение сигнал/шум составило 22,13 дБ, а вероятность ошибки $4,11 \cdot 10^{-9}$. Следовательно, полученное значение вероятности ошибки удовле-

творяет нормам, а проектируемую волоконно-оптическую сеть цифрового кабельного телевидения с такими выбранными параметрами можно реализовать на практике.

В качестве второго проектного решения предположим, что в волоконно-оптическом тракте из предыдущего примера исключен усилитель (ВОУ). Снова произведем расчет вероятности ошибки согласно (2.1)–(2.13), при этом в связи с отсутствием усилителя расчет шумов на выходе фотодетектора оптического приемника, вносимых EDFA, не производится. Как показано ниже, при этом отношение сигнал/шум составит 16,29 (или 12,12 дБ), вероятность ошибки – $8,79 \cdot 10^{-2}$. При расчете учтем, что при отсутствии ВОУ из системы исключаются также два оптических коннектора, при этом общее затухание линии с учетом сплиттеров составит 32,5 дБ, а уровень сигнала на входе ОПР: $p_{\text{ОПР}} = -12,5$ дБм.

Действительно, используя (2.1) – (2.13), получим

$$\begin{aligned}
 P_{\text{ш. ОП}} &= (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-12,5)})^2 \cdot 10^{-15} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,71 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} = 0,71 \cdot 10^{-10} \text{ мВт}; \\
 P_{\text{ш. ОПр. дп}} &= 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-12,5)} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,54 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = 0,54 \cdot 10^{-9} \text{ мВт}; \\
 P_{\text{ш. ОПр. т}} &= 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 294 \cdot 4 \cdot 800 \cdot 10^6 = 0,81 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} = 0,81 \cdot 10^{-8} \text{ мВт}; \\
 P_c &= (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-12,5)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 = 0,14 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} = 0,14 \cdot 10^{-6} \text{ мВт}; \\
 P_c/P_{\text{ш}} &= (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-12,5)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,71 \cdot 10^{-13} + 0,54 \cdot 10^{-12} + \\
 &\quad + 0,81 \cdot 10^{-11}) = 16,29 \text{ (12,12 дБ)}; \\
 P_{\text{ош}} &\approx \frac{2(1 - 4^{-1})}{\log_2 4} \times \\
 &\times Q \left[\sqrt{\frac{3(0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-12,5)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,71 \cdot 10^{-13} + 0,54 \cdot 10^{-12} + 0,19 \cdot 10^{-11} + 0,81 \cdot 10^{-11})}{4^2 - 1}} \right] = \\
 &= 8,79 \cdot 10^{-2}.
 \end{aligned}$$

Как следует из ранее сказанного, при таком построении сети нельзя восстановить требуемую помехозащищенность за счет декодера Рида – Соломона.

Для уменьшения вероятности ошибки возможны следующие варианты проектирования [31, 38, 41]:

а) установить волоконно-оптический усилитель (см. первый вариант проекта и параметры в таблицах 2.1 и 2.2);

б) уменьшить длину волоконно-оптического тракта и количество подключенных абонентов (например, использовать сплиттеры с меньшим затуханием);

в) усложнить схему приемного устройства для ослабления влияния тепловых шумов (например, использовать лавинный фотодиод).

Каждый из предложенных вариантов требует самостоятельного расчета по вышеприведенной методике с учетом факторов стоимости и надежности сети доступа [42, 43].

2.2 Анализ защищенности от собственных шумов в гибридных сетях кабельного цифрового телевидения

В разделе 2.1 рассматривался наиболее современный и оптимальный по скорости передачи, протяженности линии связи и количеству активного оборудования вариант доставки телевизионного контента от ГС к абонентам через пассивные оптические сети PON. Однако существуют районы старой застройки, в которых телевизионные сигналы распределяются по коаксиальным линиям связи. В этом случае целесообразно строить так называемые «гибридные» (оптико-коаксиальные) сети НФС [12]. Здесь участок от ГС до АТС (участок l_1 на рисунке 2.1) построен на основе волоконно-оптической линии связи, а участок от АТС до АР в квартире абонента (участок l_2 на рисунке 2.1) – на основе типовой коаксиальной распределительной сети.

Далее определим допустимые показатели качества каждого из участков сети кабельного цифрового телевидения – оптического и коаксиального.

При расчете отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе коаксиальной сети необходимо учитывать шумы входного электрического сигнала (на выходе ВОЛС). Если входной сигнал имеет ОСШ по мощности $S_{\text{ВОЛС}}$, то ОСШ по мощности на выходе сети НФС (на выходе коаксиального участка) можно рассчитать из известного соотношения [12]:

$$1/S_{\text{вых}} = 1/S_{\text{ВОЛС}} + 1/S_{\text{к}}, \quad (2.15)$$

где $S_{\text{к}}$ – ОСШ по мощности на выходе коаксиального участка сети НФС без учета шумов от участка ВОЛС.

Методика расчета ОСШ по мощности для ВОЛС подробно изложена в разделе 2.1, поэтому далее рассмотрим процесс накопления шумов в коаксиальном тракте.

Обобщенная структурная схема коаксиального участка сети НФС представлена на рисунке 2.4 [21].

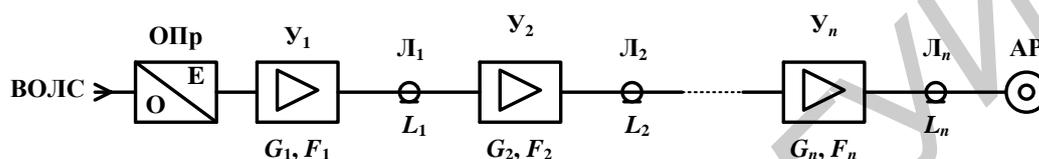


Рисунок 2.4 – Обобщенная структурная схема коаксиального участка

Здесь ОПр – оптический приемник, который является последней структурной единицей ВОЛС (ОСШ по мощности на его выходе и будет искомым $S_{\text{ВОЛС}}$). Далее следуют n электронных усилителей Y_1 – Y_n , которые предназначены для компенсации потерь кабельных участков линий передачи L_1 – L_n . Каждый усилитель характеризуется коэффициентом усиления по мощности G_i и шум-фактором NF_i [12]. Потери в коаксиальных линиях определяются коэффициентом передачи по мощности L_i , который зависит от типа кабеля, длины кабельного участка, наличия муфт и ответвителей [21]. Как правило, общие потери на участке линии передачи настолько велики, что выполняются условия $L_1 \ll 1$, $L_2 \ll 1$, ..., $L_n \ll 1$. Поскольку усилители устанавливаются в основном для компенсации потерь в линиях передачи, то всегда выполняются условия $G_1L_1 \approx 1$, $G_2L_2 \approx 1$, ..., $G_nL_n \approx 1$.

В общем случае суммарную мощность тепловых шумов коаксиальной сети на абонентской розетке AP можно рассчитать по следующей формуле [34]:

$$P_{\text{ш. к}} = P_0(NF_1 - 1)G_1L_1G_2L_2 \dots G_nL_n + P_0(1 - L_1)G_2L_2G_3L_3 \dots G_nL_n + \\ + P_0(NF_2 - 1)G_2L_2G_3L_3 \dots G_nL_n + \dots + P_0(1 - L_{n-1})G_nL_n + \\ + P_0(NF_n - 1)G_nL_n + P_0(1 - L_n). \quad (2.16)$$

Здесь $P_0 = kT_0\Delta f$ – мощность теплового шума, выделяемая в согласованную нагрузку; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/(Гц·град) – постоянная Больцмана; $T_0 = 293$ К – стандартная температура окружающей среды; Δf – шумовая полоса, Гц.

Если принять, что выполняется условие $G_i L_i \approx 1$ ($i = 1, 2 \dots n$), то формулу (2.16) можно привести к более простому виду [12, 21, 25]:

$$P_{\text{ш.к}} \approx P_0(NF_1 + NF_2 + \dots + NF_n). \quad (2.17)$$

При этом мощность полезного сигнала на абонентской розетке равна $P_{\text{с.к}} = P_{\text{вх.к}} G_1 L_1 G_2 L_2 \dots G_n L_n \approx P_{\text{вх.к}}$, где $P_{\text{вх.к}}$ – мощность полезного сигнала на входе коаксиального сегмента. Соответственно, ОСШ $S_{\text{к}} = P_{\text{с.к}} / P_{\text{ш.к}} \approx P_{\text{вх.к}} / [P_0(NF_1 + NF_2 + \dots + NF_n)]$ [32].

Однако накопление тепловых шумов при прохождении телевизионного сигнала по сети кабельного телевидения не является основным ограничивающим фактором. Более существенное ограничение возникает из-за взаимовлияния телесигналов, то есть появления комбинационных помех второго и третьего порядка [7]. При использовании нескольких последовательно включенных усилителей необходимо рассчитать максимально допустимый выходной уровень (МВУ) на выходе каждого усилителя. Это необходимо для определения нужного режима работы усилительного каскада с целью уменьшения искажений второго и третьего порядка (увеличение числа последовательно включенных идентичных усилителей требует уменьшения МВУ в каждом усилителе для компенсации возрастания искажений). Это служит ограничивающим фактором при определении таких показателей, как мощность полезного сигнала на входе коаксиального сегмента, максимальный коэффициент усиления усилителей, а также максимальное число усилительных участков сети кабельного телевидения и, следовательно, ее общая протяженность [72].

Можно утверждать, что разница между МВУ и тепловым шумом на выходе n -го усилителя, выраженная в децибелах, и есть не что иное, как ОСШ в децибелах. Для систем аналогового телевидения эта величина должна быть не

меньше 43 дБ [21]. По сравнению с ними у стандарта DVB-C есть свои преимущества:

1. Существенная экономия частотного ресурса. В одном стандартном телевизионном радиоканале в полосе частот 6–8 МГц размещаются 4–8 телевизионных программ в цифровом формате [40]. Это означает, что для передачи, например, 240 спутниковых ТВ-программ потребуется не более 60 каналов.

2. Более низкий шумовой порог (не менее 36 дБ при применении одноступенчатого помехоустойчивого кодирования). Расчеты показывают, что при использовании стандарта DVB-C возможно увеличение зоны обслуживания в 10 и более раз [15, 39].

Однако при применении помехоустойчивого кодирования Рида – Соломона, чьи восстановительные механизмы начинают работать при вероятности ошибки $2 \cdot 10^{-4}$ и ниже, шумовой порог еще больше снижается. На рисунке 2.5 приведены графики зависимости вероятности ошибки BER от нормированного отношения сигнал/шум E_b/N_0 (в децибелах) для различных видов модуляций [62].

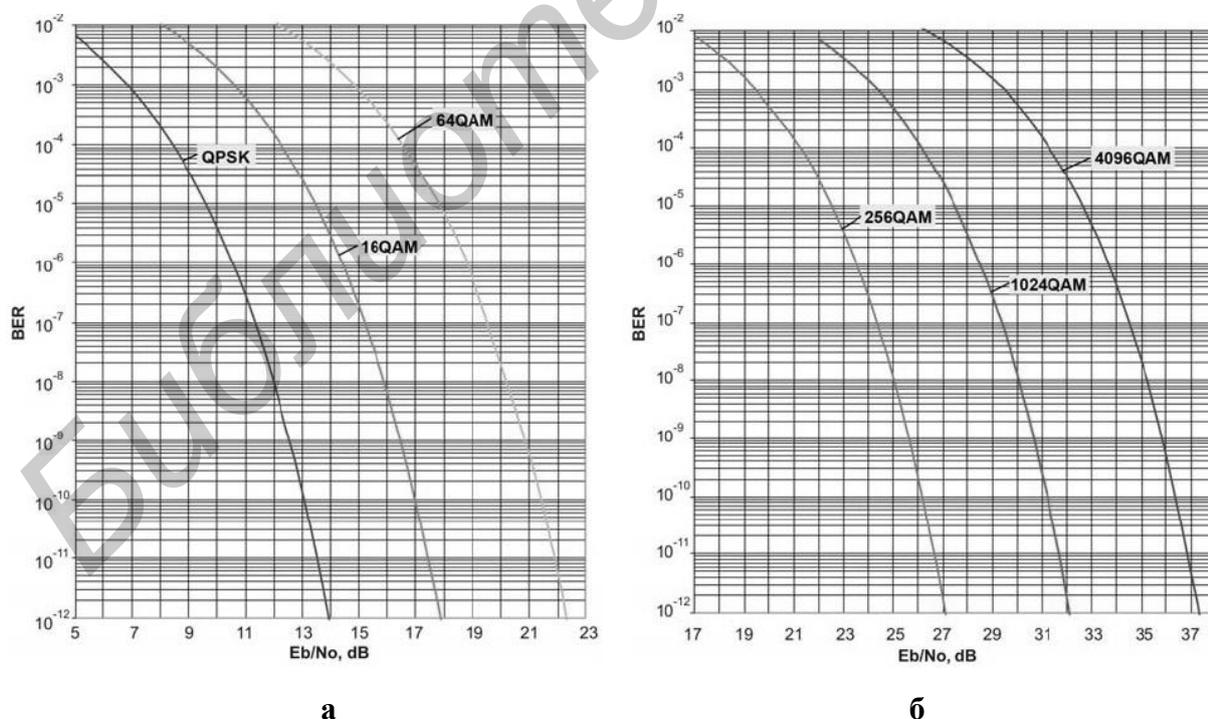


Рисунок 2.5 – Графики зависимости вероятности ошибки BER от нормированного отношения сигнал/шум E_b/N_0

Приведенные зависимости совпадают с формулой (2.12) раздела 2.1, только нужно иметь в виду простое соответствие между ОСШ и нормированным отношением E_b/N_0 [62]:

$$s_k = 10\lg(S_k) = E_b/N_0 + 10\lg(m), \text{ дБ}, \quad (2.18)$$

где $m = \log_2 M$ – число бит, заменяемых одним многоуровневым символом информации (M – число позиций модуляции QAM-сигнала).

Для примера возьмем модуляцию QAM-16 (как в разделе 2.1). Как видно из рисунка 2.5, а, «порог» срабатывания механизма кода Рида – Соломона, когда $BER \leq 10^{-4}$ и $M = 16$, наступит при $E_b/N_0 \approx 13$ дБ. Тогда $m = 4$ и по формуле (2.18) ОСШ s_k составит 19 дБ. Следовательно, для нормального функционирования сети необходимо, чтобы разница между уровнем мощности накопленного теплового шума и МВУ на выходе последнего усилителя составляла не менее 19 дБ [25].

Как правило, в паспорте на усилители указывают МВУ в режиме усиления двух или трех сигналов (то есть с учетом одного дополнительного продукта искажений второго или третьего порядка). Реальные же МВУ для каждой конкретной сети в зависимости от числа K телевизионных каналов и числа n последовательно включенных усилителей можно определить из выражений (2.19) и (2.20) [12, 21]:

$$A_{\text{МВУ.К}} = A_{\text{МВУ.П}} - 7,5\lg(K - 1); \quad (2.19)$$

$$A_{\text{МВУ.К.н}} = A_{\text{МВУ.К}} - 10\lg(n), \quad (2.20)$$

где $A_{\text{МВУ.К}}$ – МВУ в режиме усиления K телевизионных каналов, дБмкВ;

$A_{\text{МВУ.П}}$ – паспортное МВУ с учетом дополнительных искажений второго или третьего порядка, дБмкВ;

$A_{\text{МВУ.К.н}}$ – МВУ в режиме усиления K телевизионных каналов с числом идентичных усилителей, равным n , дБмкВ.

Приведем пример расчета для гибридной сети с типовыми параметрами, значения которых взяты из документации поставщиков оборудования для сетей кабельного телевидения [60]. В частности, рассмотрим гибридную волоконно-

коаксиальную сеть, у которой участок от ГС до АТС представляет собой ВОЛС ($l_1 = 20$ км), от АТС до АР – коаксиальный тракт ($l_2 = 15$ км). Исходные данные и результаты расчетов сведем в таблицы 2.4 и 2.5, используя методику расчета, изложенную в разделе 2.1.

Таблица 2.4 – Исходные данные для расчета волоконно-коаксиальной сети

Наименование параметра	Значение
А. Волоконно-оптический участок сети	
Длина волоконно-оптического тракта l_1 , км	20
Затухание участка l_1 , дБ	6
Уровень сигнала на выходе оптического передатчика $P_{\text{ОП.вых}}$, дБм	20
Уровень сигнала на входе оптического приемника $P_{\text{ОПр.вх}}$, дБм	14
Относительная интенсивность шума оптического передатчика RIN , 1/Гц	10^{-15}
Чувствительность фотодиода r , А/мВт	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Шум-фактор предусилителя $NF_{\text{предус}}$, отн. ед.	4
Индекс оптической модуляции m , отн. ед.	0,04
Мощность шумов на выходе фотодетектора ОПр, создаваемых за счет шумовых процессов в оптическом передатчике, $P_{\text{ш.ОП}}$, мВт	$0,12 \cdot 10^{-4}$
Мощность дробовых шумов оптического приемника $P_{\text{ш.ОПр.др}}$, мВт	$0,22 \cdot 10^{-6}$
Мощность тепловых шумов оптического приемника $P_{\text{ш.ОПр.т}}$, мВт	$0,81 \cdot 10^{-8}$
Мощность полезного сигнала на выходе оптического приемника P_c , мВт	$0,24 \cdot 10^{-1}$
Отношение сигнал/шум $p_c/p_{\text{ш}}$ (сВОЛС), дБ	32,93
Б. Коаксиальный участок сети	
Затухание кабеля на каждые 100 м на частоте 870 МГц, дБ [60]	7
Усиление усилителей G_i , дБ [60]	40
Шум-фактор усилителей NF_i , отн. ед. [60]	6,3 (8 дБ)
Затухание каждого усилительного участка L_i , дБ [60]	40
Паспортный МВУ (при обеспечении требуемой защищенности от интермодуляции второго порядка в 54 дБ) $A_{\text{МВУ.П2}}$, дБмкВ [60]	114
Паспортный МВУ (при обеспечении требуемой защищенности от интермодуляции третьего порядка в 60 дБ) $A_{\text{МВУ.П3}}$, дБмкВ [60]	110
Количество стандартных телевизионных каналов K	60
Длина коаксиального тракта l_2 , км	15
Необходимое число усилителей в линии n (примерно каждые 570 м)	26

Так как методика расчета волоконно-оптического участка сети подробно рассматривалась в разделе 2.1, то далее более детально рассмотрим методику расчета для коаксиального участка, а также расчета результирующего ОСШ гибридной волоконно-коаксиальной сети.

По формулам (2.19) и (2.20) рассчитаем МВУ в режиме усиления K телевизионных каналов и МВУ в режиме усиления K телевизионных каналов с числом идентичных усилителей, равным n ($K = 60$; $n = 26$, см. таблицу 2.4):

$$\begin{cases} A_{\text{МВУ.К}} = 110 - 7,5\lg(60 - 1) = 96,72 \text{ дБмкВ}; \\ A_{\text{МВУ.К.n}} = 96,72 - 10\lg(26) = 82,57 \text{ дБмкВ}. \end{cases}$$

По формуле (2.17) рассчитаем уровень мощности шумов на выходе коаксиального участка:

$$P_{\text{ш.к}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 26 \cdot 6,3 = 0,53 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}; p_{\text{ш.к}} = -62,74 \text{ дБм}.$$

Определим ОСШ коаксиального участка как разницу между МВУ $A_{\text{МВУ.К.n}}$ и тепловым шумом $p_{\text{ш.к}}$ на выходе n -го усилителя:

$$s_{\text{к}} = 82,57 - 107 - (-62,74) = 38,31 \text{ дБ},$$

где 107 – коэффициент приведения децибелов относительно микровольтов в децибелы по мощности на нагрузке в 50 Ом [52, 62].

Примечание – Коэффициент приведения размерности децибелов относительно микровольтов в децибелы по мощности на нагрузке $R_{\text{н}} = 50$ Ом получается из следующих общеизвестных соотношений:

а) $U_{\text{МВУ}} (\text{В}) = 10^{-6} \cdot 10^{0,05 A_{\text{МВУ.К.n}} (\text{дБмкВ})}$;

б) $P (\text{Вт}) = U_{\text{МВУ}}^2 (\text{В}) / R_{\text{н}}$;

в) $p (\text{дБм}) = 10 \cdot \lg(1000 \cdot P (\text{Вт}))$.

Если принять $A_{\text{МВУ.К.n}} = 82,57$ дБмкВ, то

$$U_{\text{МВУ}} = 1,34 \cdot 10^{-2} \text{ В}, \quad P = 3,60 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}, \quad p = -24,42 \text{ дБм}.$$

Следовательно, коэффициент приведения размерности от микровольтов к децибелам на нагрузке $R_{\text{н}} = 50$ Ом составит $82,57 - (-24,42) = 107$ дБ.

Далее определим результирующее ОСШ сети НФС по формуле (2.15):

$$S_{\text{ВЫХ}} = 1/(1/10^{0,1 \cdot 32,93} + 1/10^{0,1 \cdot 38,31}) = 1520 \text{ (31,82 дБ)}$$

В выражениях (2.19) и (2.20) учитывается эффект накопления нелинейных искажений (продуктов) с ростом числа телевизионных каналов K и усилительных пунктов n . Результирующее ОСШ с учетом шумов волоконно-оптического участка несколько снижается по сравнению с ОСШ непосредственно коаксиального участка (31,81 дБ против 38,31 дБ).

Таблица 2.5 – Результаты расчета коаксиального участка сети

Наименование параметра	Значение
Уровень мощности шумов на выходе коаксиального участка $p_{\text{ш.к}}$, дБм (по формуле (2.17))	-62,74
МВУ $A_{\text{МВУ.К}}$ (с учетом искажений третьего порядка в режиме усиления K телевизионных каналов), дБмкВ (по формуле (2.19))	96,72
МВУ $A_{\text{МВУ.К.н}}$ (с учетом искажений третьего порядка в режиме усиления K телевизионных каналов с числом идентичных усилителей, равным n), дБмкВ (по формуле (2.20))	82,57
ОСШ коаксиального участка на абонентской розетке АР $s_{\text{к}}$, дБ	38,31
ОСШ по мощности на выходе сети НФС $S_{\text{ВЫХ}}$ (по формуле (2.15)), дБ	31,81

Приведем пример определения допустимых форматов модуляций для каждого случая с помощью графиков на рисунке 2.5, б.

Для модуляции QAM-1024 (число позиций модуляции $M = 1024$, число бит, заменяемых одним многоуровневым символом информации, $m = \log_2 M = 10$) порог срабатывания механизмов кодозащиты Рида – Соломона наступает при $BER \cong 10^{-4}$ и $E_b/N_0 \approx 26,5$ дБ. Соответственно, по формуле (2.18) определяем отношение сигнал/шум $s_{\text{к}} = 26,5 + 10 \lg(10) = 36,5$ дБ. Сравнивая это значение с рассчитанным для коаксиального участка ($s_{\text{к}} = 38,31$ дБ), видим, что модуляцию QAM-1024 можно использовать в данном случае, однако для результирующего ОСШ гибридной сети ($s_{\text{к}} = 31,81$ дБ) результат будет неудовлетворительный.

Проведя аналогичный расчет для модуляции QAM-256 ($M = 256$, $m = \log_2 M = 8$, $E_b/N_0 \approx 21,5$ дБ), можно показать, что допустимое отношение сигнал/шум $s_k = 30,5$ дБ, следовательно, данный вид модуляции пригоден для использования в рассматриваемой волоконно-коаксиальной сети.

Также стоит обратить внимание на требуемое наличие большого количества активного оборудования на коаксиальном участке: при длине тракта в 15 км, которую полностью обслуживала пассивная оптическая сеть (см. раздел 2.1), необходимо установить 26 усилителей, что приводит к росту затрат на прокладку и эксплуатацию сети [26].

Что касается волоконно-оптического участка гибридной сети, то, как видно из таблицы 2.4, при отсутствии пассивного волоконно-оптического участка основной вклад в результирующее значение мощности шума вносят не тепловые шумы оптического приемника (см. таблицу 2.3), а шумы оптического передатчика. Однако отношение сигнал/шум значительно увеличивается (32,91 дБ против 20,56 дБ).

Если же взять более качественный оптический передатчик с относительной интенсивностью шума RIN , равной 10^{-16} 1/Гц, то мощность шумов на выходе оптического приемника, создаваемых за счет шумовых процессов в оптическом передатчике, $P_{ш.оп}$ составит $0,12 \cdot 10^{-5}$ мВт, а отношение сигнал/шум $S_{волс}$ повысится до 42,10 дБ (по формуле (2.5)) [29]. Действительно,

$$P_{ш.оп} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)})^2 \cdot 10^{-16} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,12 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} = 0,12 \cdot 10^{-5} \text{ мВт.}$$

Тогда по формуле (2.11)

$$S = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-7)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,12 \cdot 10^{-8} + 0,22 \cdot 10^{-9} + 0,81 \cdot 10^{-11}) = 16200;$$

$$s = 42,10 \text{ дБ.}$$

2.3 Анализ основных способов оптимизации параметров распределительных сетей цифрового кабельного телевидения

В разделах 2.1 и 2.2 указывалось, что при слишком низком ОСШ необходимо изменять «локальные» параметры сети (длину оптического и электриче-

ского тракта, число оптических и электронных усилителей, коэффициент усиления усилителей, количество подключенных абонентов и т. п.) и производить соответствующий перерасчет ОСШ.

В случае, если структура сети задана строго, можно выделить три основных направления оптимизации так называемых «глобальных» параметров сети:

- а) выбор стандартов передачи телевизионных сигналов по кабельным сетям;
- б) варьирование методами передачи сигналов цифрового спутникового телевидения по кабельным сетям;
- в) интеграция наиболее оптимальным способом цифровых головных станций в уже существующую общегородскую волоконно-оптическую сеть (исходя из возможности резервирования в аварийных ситуациях и экономии используемого оборудования при развертывании сети).

Рассмотрим подробнее каждое из этих трех направлений.

2.3.1 Подбор стандартов передачи телевизионных сигналов по кабельным сетям

В качестве альтернативы стандарту DVB-C выступает стандарт «второго поколения» DVB-C2, который позволяет существенно повысить эффективность использования спектра. Это достигается за счет применения более высоких размерностей QAM-модуляции (до QAM-4096) в сочетании с мощной системой помехоустойчивого кодирования на базе LDPC-кодов (кодов с малой плотностью проверок на четность). Коды этого класса известны еще с 60-х годов прошлого века, но их практическое использование стало возможным только в последние годы благодаря достижениям в области цифровых технологий. Преимущества их применения можно проиллюстрировать следующими цифрами: поток DVB-C2 с относительной скоростью кодозащиты 9/10 может быть восстановлен декодером даже при плотности ошибок в несколько процентов ($p_{\text{ош}} \cong 10^{-2}$), тогда как применяемый в DVB-C код Рида – Соломона при той же

относительной скорости может восстановить поток до квазибезошибочного состояния при плотности ошибок не более $2 \cdot 10^{-4}$ (см. подраздел 2.1.6) [89].

Примечание – Коэффициент относительной скорости кодозащиты вида n/m характеризует такое преобразование исходного двоичного потока, когда каждая последующая n -разрядная группа данных заменяется m -разрядной группой ($m > n$), в которой введены дополнительные биты, позволяющие на приемной стороне обнаружить и исправить пораженные помехой информационные разряды.

Определенный выигрыш в плане гибкости и эффективности дает применение ортогонального частотного мультиплексирования OFDM, что позволяет удешевить создание единых приемных чипсетов, пригодных для систем наземного и кабельного цифрового телевидения DVB-T2/C2 [89].

Допустимые по стандарту DVB-C2 значения отношения сигнал/шум в децибелах приведены в таблице 2.6 [89].

Таблица 2.6 – Допустимые значения ОСШ для стандарта DVB-C2

Скорость кодозащиты	QAM-16	QAM-64	QAM-256	QAM-1024	QAM-4096
2/3	-	13,5 дБ	-	-	-
3/4	-	-	20,0 дБ	24,8 дБ	-
4/5	10,7 дБ	16,1 дБ	-	-	-
5/6	-	-	22,0 дБ	27,2 дБ	32,4 дБ
9/10	12,8 дБ	18,5 дБ	24,0 дБ	29,5 дБ	35,0 дБ

Покажем на примере преимущества стандарта DVB-C2. Пусть к сети PON (см. таблицы 2.1–2.3) подключены не 32, а 64 абонента. Примем затухание, вносимое сплиттером 1:64, равным 21 дБ [75], тогда очевидно, что уровень сигнала на входе ОПр уменьшится и составит $P_{\text{ОПр}} = -11$ дБм.

Шум на выходе фотодетектора оптического приемника, создаваемого оптическим передатчиком, согласно формуле (2.5) определим в виде

$$P_{\text{ш.оп}} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)})^2 \cdot 10^{-15} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,14 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = 0,14 \cdot 10^{-9} \text{ мВт}.$$

Мощность шума на выходе фотодетектора, обусловленную наличием ВОУ EDFA, определим по формуле (2.6)

$$P_{ш.yc} = 4 \cdot 0,6 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)} \cdot 0,6 \cdot 1,53 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-0,13150} = 0,46 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} = 0,46 \cdot 10^{-11} \text{ мВт}.$$

Мощность дробового шума фотодетектора рассчитаем по формуле (2.9)

$$P_{ш.ОПр.др} = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)} \cdot 800 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,76 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = 0,76 \cdot 10^{-9} \text{ мВт}.$$

Далее определим мощность полезного сигнала на выходе ОПР и результирующее отношение сигнал/шум (см. формулу (2.11)):

$$P_c = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 = 0,28 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ мВт};$$

$$P_c/P_{ш} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,14 \cdot 10^{-12} + 0,46 \cdot 10^{-14} + 0,76 \cdot 10^{-12} + 0,81 \cdot 10^{-11}) = 31,41 \text{ (14,97 дБ)}.$$

Для модуляции QAM-16 вероятность ошибки согласно формуле (2.13) будет равна

$$p_{ош16} \approx \frac{2(1 - 4^{-1})}{\log_2 4} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{3(0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50}{(4^2 - 1) \cdot (0,14 \cdot 10^{-12} + 0,46 \cdot 10^{-14} + 0,76 \cdot 10^{-12} + 0,81 \cdot 10^{-11})}} \right] = 0,46 \cdot 10^{-2}.$$

Поскольку полученная вероятность ошибки превышает необходимую плотность ошибок для срабатывания восстановительных механизмов кода Рида – Соломона, равную $2 \cdot 10^{-4}$ (то есть при использовании стандарта DVB-C), то считаем, что модуляцию QAM-16 в данном случае использовать нельзя.

Возможным остается лишь использование модуляции QAM-4. Для нее

$$p_{ош4} \approx \frac{2(1 - 2^{-1})}{\log_2 2} \cdot Q \left[\sqrt{\frac{3(0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-11)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,14 \cdot 10^{-12} + 0,46 \cdot 10^{-14} + 0,76 \cdot 10^{-12} + 0,81 \cdot 10^{-11})}{2^2 - 1}} \right] = 1,04 \cdot 10^{-8}.$$

Отметим, что при использовании стандарта DVB-C2 и более помехоустойчивого LDPC-кода (см. таблицу 2.6, первый и второй столбцы) возможно применить не только модуляцию QAM-16, но и модуляцию более высокого порядка QAM-64 [33].

Однако по данным многочисленных интернет-источников [60] в настоящее время внедрение стандарта DVB-C2 в странах СНГ еще практически осуществляется. В крупных городах и административных центрах Российской Федера-

ции и Республики Беларусь передача сигналов кабельного цифрового телевидения пока проводится по стандарту DVB-C. Предполагается, что стандарт DVB-C2 будет внедрен в ближайшие годы.

2.3.2 Варьирование методами передачи сигналов цифрового спутникового телевидения по кабельным сетям

В разделах 2.1 и 2.2 рассмотрен наиболее распространенный способ передачи спутниковых сигналов цифрового телевидения по волоконно-оптическим (либо коаксиальным) сетям доступа – путем непосредственного транскодирования на головной станции спутникового сигнала с квадратурно-фазовой модуляцией (QPSK) в сигнал с квадратурно-амплитудной модуляцией (QAM) для последующей передачи по волоконно-оптическим линиям связи. Однако известен другой способ трансляции спутниковых сигналов по сетям кабельного телевидения – способ непосредственного распределения спутниковых сигналов в сети кабельного телевидения в стандартном диапазоне 47–862 МГц [86].

Принцип действия такой системы представлен на рисунке 2.6.

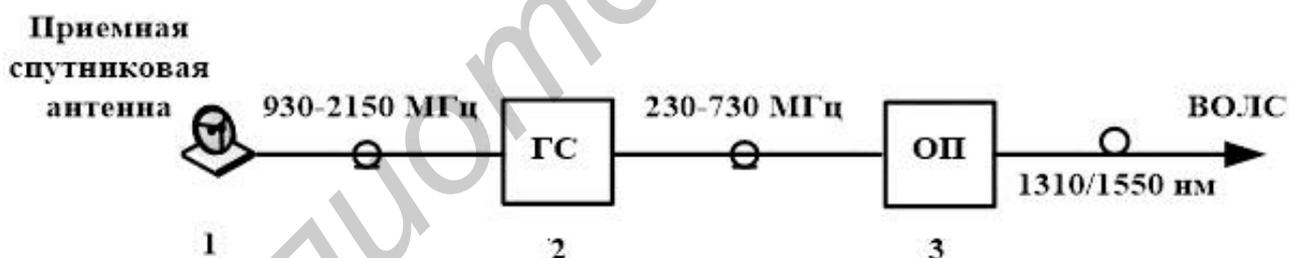


Рисунок 2.6 – Схема непосредственного распределения спутниковых каналов через сеть кабельного телевидения в стандартном диапазоне

Сигнал, принятый спутниковой антенной 1 и конвертируемый затем в полосу частот 950–2150 МГц, на головной станции ГС 2 преобразуется одним или несколькими групповыми понижающими преобразователями частоты в традиционный для кабельных сетей диапазон 250–730 МГц [86]. При этом сохраняется тип модуляции QPSK, а полоса частот одного канала по-прежнему будет составлять 27 либо 36 МГц [51, 69]. Соответственно, число транслируемых ка-

налов будет невелико: традиционные ГС позволяют конвертировать не более 10 каналов со стандартной полосой 27 или 36 МГц, что является основным недостатком этого метода передачи спутниковых сигналов по сетям кабельного телевидения [51].

Далее с помощью оптического передатчика ОП 3 сигнал распределяется в выделенном оптическом диапазоне по волоконно-оптической линии связи ВОЛС. На абонентской стороне устанавливается приемный модуль (абонентский или коллективный конвертер), который переносит спектр группового сигнала в диапазон 950–2150 МГц. За счет такой конвертации решается задача использования типовых спутниковых транспондеров (ресиверов) с полосой канала до 36 МГц совместно с уже существующими или вновь строящимися сетями кабельного телевидения [86].

Свободные частотные диапазоны 47–230 МГц и 750–862 МГц можно использовать для трансляции DVB-каналов со стандартными полосами в 8 МГц, которые характерны для наземных сетей цифрового телевидения DVB-T. Для этого на головных станциях ГС используются специальные частотные сумматоры [69, 86].

Необходимо отметить, что наличие абонентского повышающего конвертера может сыграть роль своеобразного «ключа доступа» к просмотру телепередач в гостиничных комплексах, санаториях, студенческих городках. Например, если у абонента установлен только телевизор, то он получает доступ только к базовому социальному пакету каналов с полосой 8 МГц. Абоненты, желающие иметь доступ к пакету каналов спутникового телевидения помимо телевизора должны иметь абонентский конвертер и спутниковый ресивер [69].

Для большей наглядности основные характеристики рассмотренных способов передачи спутниковых сигналов по кабельным сетям (способа непосредственной трансмодуляции QPSK→QAM и способа распределения спутниковых сигналов через сеть кабельного телевидения в стандартном диапазоне 47–862 МГц без преобразования вида модуляции) сведены в таблицу 2.7.

В разделе 2.1 приведен порядок расчета вероятности ошибки на выходе волоконно-оптической системы, который пригоден и для случая непосредственного распределения спутниковых каналов через сеть кабельного телевидения. Однако результирующую формулу расчета вероятности ошибки $p_{\text{ош}}$ в групповом электрическом сигнале для модуляции QPSK (которую иногда обозначают как QAM-4) можно упростить.

Таблица 2.7 – Сравнение способов передачи спутниковых сигналов по кабельным сетям [69, 86]

Способы трансляции	Трансмодуляция QPSK→QAM	Распределение спутниковых каналов через сеть кабельного телевидения в стандартном диапазоне 47–862 МГц
Диапазон частот, МГц	47–862	47–862
Конвертация формата модуляции	Да	Нет
Тип используемой модуляции	DVB-C (QAM-16, 64, 256)	DVB-S/S2 (QPSK)
Полоса канала, МГц	8	27/36
Экономия частотного спектра	Высокая	Низкая
Количество передаваемых каналов на кабель	Около 90	Около 10
Наличие дополнительного абонентского оборудования (кроме типового цифрового приемника)	Нет	Да (повышающий преобразователь частоты, спутниковый ресивер)

Перейдя в формуле (2.12) к величинам без канального индекса s и подставив $L = 2$, получим упрощенную формулу расчета вероятности ошибки $p_{\text{ош}}$ в групповом электрическом сигнале для модуляции QPSK (QAM-4) [33]:

$$p_{\text{ош}} = Q[\sqrt{P_c / P_{\text{и}}}], \quad (2.21)$$

где $Q(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-\frac{u^2}{2}) du$ – Гауссов интеграл ошибок (для упрощения расчетов значения интеграла Гаусса табулированы, см. [34]).

Как видно из графиков рисунка 2.5, модуляция QPSK является более помехоустойчивой по сравнению с такими видами модуляции, как QAM-16, QAM-64 и более высоких порядков, то есть обеспечивает меньшее значение вероятности ошибки при низких значениях ОСШ [33, 62].

Однако кроме помехоустойчивого вида модуляции у стандарта DVB-S/S2 есть и другое преимущество перед стандартом DVB-C – использование двухступенчатой кодовой защиты. Помимо кода Рида – Соломона, который используется и в стандарте DVB-C, здесь реализован дополнительный уровень защиты от ошибок с помощью сверточного кодирования. Именно декодер сверточного кода осуществляет первый уровень кодовой защиты и должен работать при вероятности ошибки входного сигнала $10^{-1} - 10^{-2}$ [2, 52], снижая ее до 10^{-4} – порогового значения для включения механизмов защиты второго уровня (кода Рида – Соломона).

Приведем пример расчета показателя качества спутникового телевизионного канала, передаваемого указанным способом по волоконно-оптической сети доступа с типовыми реальными параметрами [22, 23, 75]. При этом используем методику расчета, описанную в разделе 2.1, заменив для QPSK формулу (2.13) на (2.21) (см. рисунок 2.1 и таблицы 2.8–2.10).

По формуле (2.5) определим шум на выходе фотодетектора оптического приемника, создаваемого оптическим передатчиком:

$$P_{ш,оп} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-14)})^2 \cdot 10^{-15} \cdot 480 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,21 \cdot 10^{-13} \text{ Вт} = 0,21 \cdot 10^{-10} \text{ мВт} .$$

Далее по формуле (2.7) рассчитаем мощность усиленной спонтанной эмиссии ASE на выходе EDFA:

$$P_{ASE} = (4 \cdot 3,981 - 1) \cdot 6,6252 \cdot 10^{-34} \cdot 1,94 \cdot 10^{14} \cdot 800 \cdot 10^6 = 0,92 \cdot 10^{-9} \text{ Вт} = 0,92 \cdot 10^{-6} \text{ мВт} .$$

Мощность шума на выходе фотодетектора, обусловленную наличием BOU (EDFA), определим по формуле (2.6):

$$P_{ш,ус} = 4 \cdot 0,6 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1(-14)} \cdot 0,6 \cdot 1,53 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-0,1 \cdot 34} \cdot 50 = 0,13 \cdot 10^{-14} \text{ Вт} = 0,13 \cdot 10^{-11} \text{ мВт.}$$

Таблица 2.8 – Характеристики пассивных элементов сети доступа [22, 23, 75]

Пассивные элементы	Затухание	Длина/количество
Участок линии ОПр – эрбиевый усилитель EDFA (общее затухание $a_1 = 9$ дБ с учетом $a_{зап}$)		
Волоконно-оптический тракт l_1	0,22 дБ/км	30 км
Неразъемные соединения	0,05 дБ	13 шт.
Оптические коннекторы	0,25 дБ	2 шт.
Участок линии EDFA – ОПр (общее затухание $a_2 = 34$ дБ с учетом $a_{зап}$)		
Волоконно-оптический тракт l_2	0,22 дБ/км	30 км
Неразъемные соединения	0,05 дБ	13 шт.
Оптические коннекторы	0,25 дБ	8 шт.
Сплиттер 1:2	3,0 дБ	1 шт.
Сплиттер 1:64	21,0 дБ	1 шт.

Таблица 2.9 – Характеристики активных элементов сети доступа [22, 23, 75]

Параметр	Значение параметра
Уровень сигнала на выходе ОП $p_{ОП,вых}$, дБм	20
Уровень сигнала на входе EDFA $p_{ус,вх}$, дБм	11
Уровень сигнала на выходе EDFA $p_{ус,вых}$, дБм	20
Шум-фактор усилителя EDFA NF , отн. ед.	4
Уровень сигнала на входе ОПр $p_{ОПр,вх}$, дБм	-14
Сопротивление нагрузки фотодиода R_n , Ом	50
Квантовая эффективность η	0,6
Чувствительность фотодиода r , А/Вт	0,75
Относительная интенсивность шума ОП RIN , 1/Гц	10^{-15}
Шум-фактор предусилителя $NF_{предус}$, отн. ед.	4
Индекс оптической модуляции m	0,04
Шумовая полоса ОПр (диапазон 250–730 МГц) Δf , МГц	480
Частота ν , соответствующая длине волны 1550 нм, Гц	$1,94 \cdot 10^{14}$

Мощность дробового и теплового шумов фотодетектора рассчитаем по формулам (2.9) и (2.10) соответственно:

$$P_{ш.ОПр.др} = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1 \cdot (-14)} \cdot 480 \cdot 10^6 \cdot 50 = 0,23 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = 0,23 \cdot 10^{-9} \text{ мВт};$$

$$P_{ш.ОПр.т} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 294 \cdot 4 \cdot 480 \cdot 10^6 = 0,49 \cdot 10^{-11} \text{ Вт} = 0,49 \cdot 10^{-8} \text{ мВт}.$$

Определим мощность полезного сигнала на выходе ОПр и результирующее отношение сигнал/шум (см. формулу (2.11)):

$$P_c = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1 \cdot (-14)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 = 0,71 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} = 0,71 \cdot 10^{-7} \text{ мВт};$$

$$P_c/P_{ш} = (0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1 \cdot (-14)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,21 \cdot 10^{-13} + 0,13 \cdot 10^{-14} + 0,23 \cdot 10^{-12} + 0,49 \cdot 10^{-11}) = 13,91 \text{ (11,43 дБ)}.$$

Для модуляции QAM-16 (стандарт DVB-C) вероятность ошибки рассчитывается согласно формуле (2.13):

$$P_{ош16} \approx \frac{2(1 - 4^{-1})}{\log_2 4} \times \\ \times Q \cdot \left[\sqrt{\frac{3(0,75 \cdot 0,001 \cdot 10^{0,1 \cdot (-14)} \cdot 0,04)^2 \cdot 50 / (0,21 \cdot 10^{-13} + 0,13 \cdot 10^{-14} + 0,23 \cdot 10^{-12} + 0,49 \cdot 10^{-11})}{4^2 - 1}} \right] = \\ = 0,36 \cdot 10^{-1},$$

а для модуляции QPSK (стандарт DVB-S/S2) вероятность ошибки рассчитаем по формуле (2.21)): $P_{ошQPSK} \approx Q[\sqrt{13,91}] = 0,96 \cdot 10^{-4}$.

Результаты расчетов сведем в таблицу 2.10.

Как видно из таблицы 2.10, при построении пассивной оптической сети, которая является достаточно протяженной и разветвленной (использован сплиттер 1:64 с довольно большим затуханием в 21 дБ), из двух выбранных для расчетов видов модуляции цифрового сигнала (QPSK и QAM-16) пригодной является модуляция QPSK (то есть способ непосредственного распределения спутниковых каналов через сеть кабельного телевидения), поскольку вероятность ошибки составляет всего $0,96 \cdot 10^{-4}$ [33].

При использовании многоуровневых модуляций QAM-16 и более высоких порядков вероятность ошибки слишком высока, чтобы сработали механиз-

мы коррекции кода Рида – Соломона (для QAM-16 вероятность ошибки составляет $0,36 \cdot 10^{-1}$) [33].

Таблица 2.10 – Результаты расчетов вероятности ошибки в сети доступа в зависимости от вида модуляции

Показатель	Значение
Мощность шумов на выходе ОПр, создаваемых за счет шумовых процессов в ОП, $P_{ш.ОП}$, мВт (см. (2.5))	$0,21 \cdot 10^{-10}$
Мощность шума, вызванного биениями между компонентами оптического сигнала и ASE $P_{ш.ус}$, мВт (см. (2.6))	$0,13 \cdot 10^{-11}$
Мощность дробовых шумов ОПр $P_{ш.ОПр.др}$, мВт (см. (2.9))	$0,23 \cdot 10^{-9}$
Мощность тепловых шумов ОПр $P_{ш.ОПр.т}$, мВт (см. (2.10))	$0,49 \cdot 10^{-8}$
Суммарная мощность шумов на выходе ОПр $P_{ш}$, мВт	$0,51 \cdot 10^{-8}$
Мощность полезного сигнала на выходе ОПр P_c , мВт	$0,71 \cdot 10^{-7}$
Отношение сигнал/шум $P_c/P_{ш}$ (см. (2.11))	13,91 (11,43 дБ)
Вероятность ошибки $p_{ош}$ для модуляции QAM-16 (см. (2.13))	$0,36 \cdot 10^{-1}$
Вероятность ошибки $p_{ош}$ для модуляции QPSK (см. (2.21))	$0,96 \cdot 10^{-4}$

2.3.3 Оптимальная интеграция цифровых головных станций в существующую общегородскую телефонную волоконно-оптическую сеть

В связи с повсеместным переходом к использованию ВОЛС в городских сетях связи и абонентских сетях доступа, а также с внедрением цифрового телевидения в СКТВ (основные преимущества данного решения рассмотрены в главе 1), актуальным является вопрос выбора и размещения головных станций в структуре общегородской волоконно-оптической сети кабельного телевидения.

Можно выделить два типа головных станций в зависимости от набора выполняемых ими функций [82]:

а) ЦГС (центральная головная станция) – включает в себя оборудование для телевизионного вещания и приема телевизионного сигнала со спутников, управляет обработкой и обеспечением централизованных видов сервиса (учет абонентов, формирование пакетов услуг и др.), транслирует сформированный пакет каналов по волоконно-оптическим сетям напрямую к абонентам и к ПГС (подголовной станции);

б) ПГС (подголовная станция) – включает в себя приемопередающее оборудование для трансляции сформированного на ЦГС пакета каналов к определенной группе абонентов. Стоимость ПГС в десятки раз ниже стоимости ЦГС [82].

Как правило, выбор структуры общегородских сетей кабельного телевидения производят с учетом структуры городской телефонной сети и сети передачи данных. В настоящее время городские автоматические телефонные станции (АТС) входят в состав нескольких самовосстанавливающихся волоконных колец [76, 82]. Это обеспечивает возможность довольно быстрого переключения на резерв: если в нормальном состоянии трафик передается по часовой стрелке, то, например, при обрыве волокна есть возможность автоматического перенаправления трафика против часовой стрелки. Например, по такой схеме ведется модернизация сети города Гомеля. Целесообразно осуществлять привязку структуры СКТВ к структуре общегородской телефонной сети и сети передачи данных [36].

На рисунке 2.7 приведен наиболее оптимальный способ размещения головных станций для городской волоконно-оптической сети, упрощенно моделирующей сеть города Гомель [36].

Как видим, схема прокладки волоконно-оптического кабеля между городскими АТС города Гомеля состоит из двух волоконно-оптических колец, среднее расстояние между двумя АТС составляет около 3 км [36]. Таким образом,

оптимальным решением является установка одной ЦГС и двух ПГС в помещениях тех АТС, где есть связь с обоими волоконно-оптическими кольцами, а также есть какие-либо выносы или имеется связь с магистральной республиканской волоконно-оптической сетью.

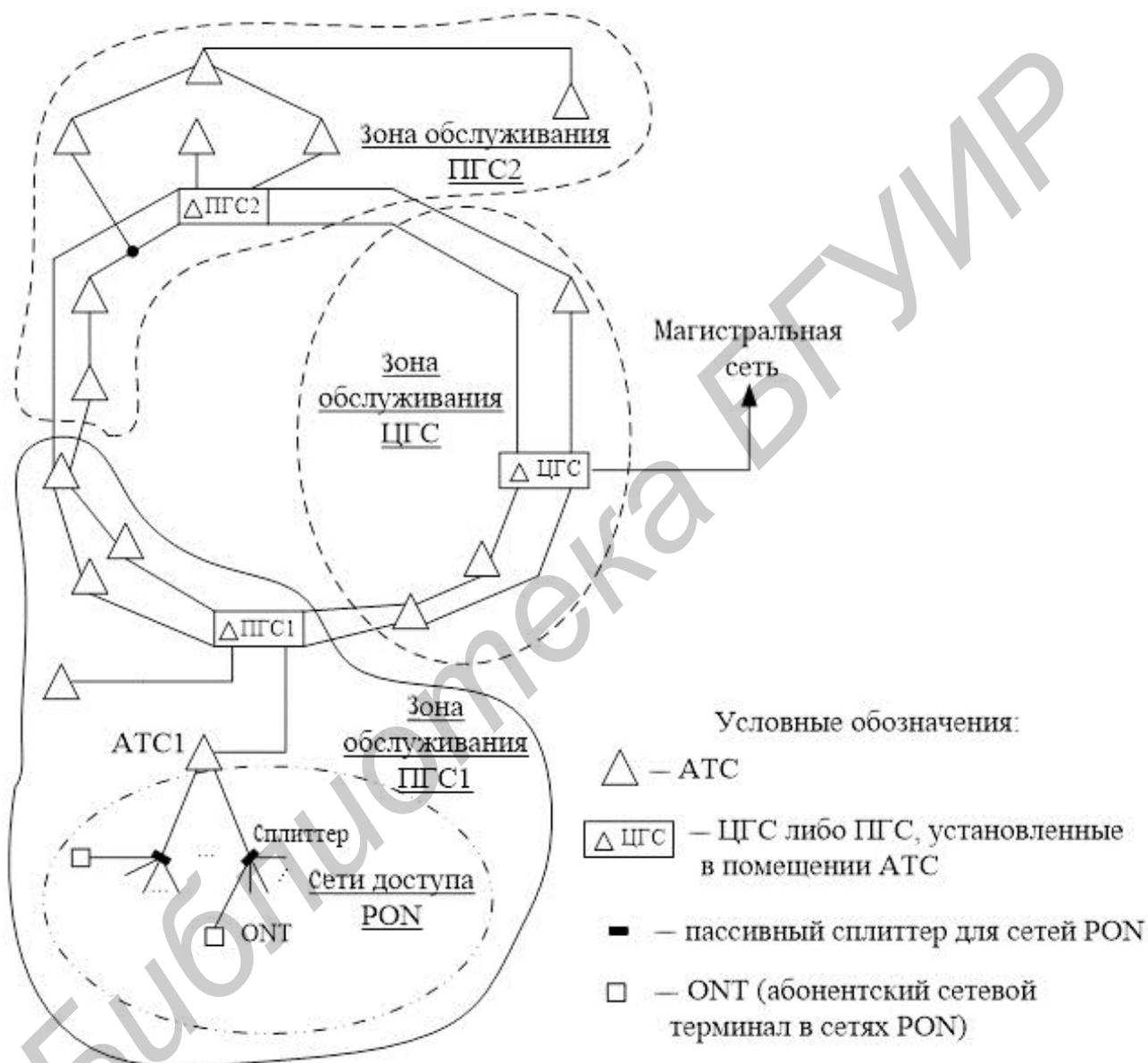


Рисунок 2.7 – Вариант построения общегородской СКТВ с использованием одной ЦГС и двух ПГС

Принцип работы данной схемы следующий: по магистральной сети передачи данных на ЦГС поступает так называемый «социальный пакет» – 8 теле-

визионных программ и 1 программа радиовещания. Также на ЦГС с помощью оборудования, подробно рассмотренного в подразделе 2.1.1, принимаются и преобразуются сигналы со спутников, подмешиваются сигналы местных теле-студий. Сформированный групповой сигнал от ЦГС доставляется на ПГС1 и ПГС2, где происходит его усиление и регенерация.

Каждая ЦГС или ПГС имеет свою зону обслуживания (см. рисунок 2.7) в составе нескольких близлежащих АТС, на которых с помощью мультиплексов телевизионный сигнал подмешивается к сигналам передачи данных и затем передается к абонентам по пассивным оптическим сетям PON [36]. Например, сигналы передачи данных передаются на длине волны 1490 нм для прямого потока к абоненту и на длине волны 1310 нм для обратного потока от абонента, а для передачи широковещательных программ цифрового кабельного телевидения используется длина волны в 1550 нм. При возникновении аварийной ситуации существует возможность автоматического перенаправления трафика и перераспределения зон обслуживания между головными станциями.

Возможной альтернативой предложенному решению является проект СКТВ с установкой всего одной ЦГС (без ПГС). Но в этом случае мы сталкиваемся со следующими неудобствами [36]:

1. Существенно увеличивается протяженность волоконно-оптического тракта от головной станции до абонента, что, в свою очередь, вызывает необходимость увеличения мощности оптических передатчиков либо установки дополнительных усилителей. Например, если посчитать длину волоконно-оптического тракта от ЦГС до АТС1 (см. рисунок 2.7), то получим $4 \cdot 3 = 12$ км, а от ПГС1 до АТС1 – $1 \cdot 3 = 3$ км. Такой выигрыш позволяет впоследствии отказаться от установки дополнительного усилителя непосредственно на АТС1 (пример расчета жизнеспособности аналогичной системы с усилителем и без него приведен в разделе 2.1).

2. Отсутствует возможность всякого резервирования. При выходе из строя оборудования ЦГС ни один абонент не получает услугу цифрового кабельного

телевидения. При наличии ПГС можно организовать базовую подачу социального пакета телевизионных каналов по магистральным линиям связи не только на ЦГС, но и на ПГС. Таким образом, в аварийной ситуации абоненты будут иметь доступ только к имеющемуся на данный момент «социальному пакету».

Еще более предпочтительным является вариант установки двух ЦГС и одной ПГС, однако, несмотря на повышенную надежность, такая схема значительно проигрывает с экономической точки зрения.

В пользу применения систем с ЦГС и несколькими ПГС также свидетельствуют и заключения экспертов о более высокой гибкости таких сетей в целом, позволяющей реализовать механизм самокупаемости систем уже на первых этапах строительства [44, 82].

Библиотека БГУИР

ГЛАВА 3

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАССИВНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ PON

Как показано в предыдущих главах, в настоящее время основным направлением модернизации абонентских сетей доступа является переход к пассивным оптическим сетям PON. Наиболее распространенным (в том числе и на территории Республики Беларусь) является стандарт GPON (Gigabit PON) в сочетании с временным разделением каналов (TDM) и древовидной топологией сети [11, 19, 22, 23]. Обобщенный вариант реализации такой концепции построения сети представлен на рисунке 2.1.

Рассмотрим подробнее принцип формирования обратного канала, то есть процесс связи абонентских терминалов ONT с линейными терминалами OLT в сетях TDM-PON: для этого используется третья длина волны 1310 нм, причем ONT передает информацию только в момент времени, отведенный для него OLT (см. раздел 1.3). Любой ONT не может связываться с другими ONT без участия OLT (все пакеты для любого адресата централизованно обрабатывает одно устройство в сети – OLT) [11, 19, 42]. Именно эти недостатки побуждают ученых, исследователей и проектировщиков к созданию новых оптимизированных концепций построения пассивных оптических сетей PON.

Таким образом, целью данной главы является исследование и анализ вариантов построения пассивных волоконно-оптических сетей PON, оценка их преимуществ и недостатков, а также моделирование участка сети для выбора оптимального режима работы по критерию относительной пропускной способности.

Для оптимизации существующей концепции TDM-PON была предложена концепция WDM-PON со спектральным (волновым – wave) разделением каналов [70]. Существует два основных варианта технологии WDM: плотный (Dense WDM, DWDM) и разреженный (Coarse WDM, CWDM). В первом случае

спектр делится на очень узкие оптические каналы (от 0,4 нм), что, с одной стороны, обеспечивает большое число спектральных каналов, но с другой стороны, значительно повышает стоимость оборудования WDM. Системы DWDM используются в первую очередь в магистральных сетях дальней связи.

В городских сетях доступа гораздо экономичнее использовать второй вариант – CWDM. В этом случае спектр в диапазоне от 1270 до 1610 нм «нарезается» на гораздо более широкие оптические каналы – по 20 нм [11]. Принцип реализации такой технологии в сетях PON представлен на рисунке 3.1.

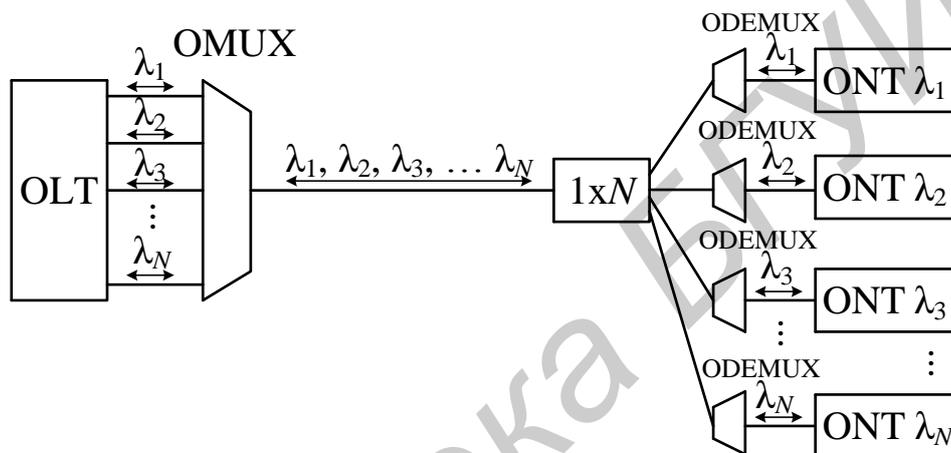


Рисунок 3.1 – Древоподобная структура сети WDM-PON

Как видно из рисунка 3.1, каждому ONT выделена своя длина волны $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$. Для объединения (выделения) различных длин волн используют оптические мультиплексоры OMUX (демультиплексоры ODEMUX). Это позволяет значительно увеличить скорость передачи. Например, в стандартной системе TDM-GPON полоса в 1,25 Гбит/с делится между всеми подключенными абонентами, а технология WDM-PON позволяет предоставлять скорость в 1 Гбит/с каждому абоненту (суммарная скорость системы при этом достигает 40 Гбит/с) [11, 35]. В отличие от системы, изображенной на рисунке 2.1, в системах WDM-PON ширококовещание (например, ширококовещательное кабельное телевидение) не развито, однако это компенсируется гораздо большей предоставляемой скоростью передачи информации [11, 35].

Если подойти к рассмотрению систем TDM-PON и WDM-PON как к IP-ориентированным пакетным сетям и рассматривать качество обслуживания трех видов трафика: речь (VoIP), видео (IPTV) и данные (DoIP), то можно выделить следующие их особенности [54–59]:

а) среднее время задержки передачи пакетов (кадров) в сегменте WDM-PON приблизительно в 20 раз ниже, чем для GPON;

б) влияние разброса длин линий на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) возрастает с ростом числа абонентов, включенных в сегмент TDM-PON, а при использовании технологии WDM-PON этот параметр не оказывает влияния на среднее время задержки передачи пакетов (кадров) из-за отсутствия временной процедуры бесконфликтного доступа;

в) для технологии WDM-PON характерно отсутствие длительного процесса доступа к обратному каналу и малая величина интервала обслуживания.

Наряду с описанным выше способом оптимизации сетей PON в части предоставления абонентам больших скоростей доступа по сравнению со стандартной древовидной технологией TDM-PON нередко возникают задачи оптимизации линий PON по протяженности, то есть увеличения расстояния между OLT и ONT для подключения удаленных абонентов (например, корпоративных – филиалы предприятий, ведомственные санатории и другие загородные объекты). Для решения данной задачи, как правило, рассматривают применение специальных волоконно-оптических разветвителей.

В частности, в работе [9] представлена конструкция сплиттера $1 \times N$, выполненная на основе звездообразного волоконно-оптического разветвителя $N \times N$ со смесительным элементом. Использование смесительного элемента обеспечивает равномерное разделение входного излучения по выходным каналам (если их число не более 150), а использование смесителя с зауженной областью и специальным рассчитываемым профилем позволяет обеспечить одномодовый характер передачи. При этом N входных однотипных каналов заменены на два

канала – один для подачи излучения накачки, а другой – информационного сигнала. Смеситель выполнен из материала, легированного эрбием, и пригоден для передачи в области третьего окна прозрачности оптических волокон. Как утверждается в [9], такое устройство обеспечивает не только равномерное разделение входного оптического сигнала, но и достаточно большой уровень выходной мощности (не менее 0 дБм), что позволяет увеличить расстояние между OLT и ONT до 100 км.

Вернемся к рассмотрению представленной на рисунке 3.1 древовидной сети WDM-PON. У нее, несмотря на высокую скорость передачи, сохраняется существенный недостаток – ONT по-прежнему не могут связываться друг с другом без участия OLT. Поэтому в качестве следующего шага оптимизации данного вида сетей рассматривают варианты разгрузки центрального узла OLT при взаимодействии ONT друг с другом [35].

Например, в работе [10] предложена следующая модель WDM-PON (рис. 3.2): древообразный разветвитель $1 \times N$ заменен на звездообразный разветвитель типа $N \times N$. В этом случае, если хватает ресурса по количеству каналов, можно использовать взаимодействие как с OLT, так и независимо между абонентскими ONT: «первая линейка» длин волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ применяется для взаимодействия с OLT, «вторая линейка» длин волн $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \lambda_{N+3}, \dots, \lambda_{N+K}$ используется для непосредственного взаимодействия между абонентскими ONT сетевого сегмента.

При этом предполагается, что разветвитель $N \times N$ передает во все каналы, в том числе и смежные, все длины волн с одинаковыми коэффициентами передачи, а выбор принимаемых каналов осуществляется как оборудованием абонентов (ONT), так и оборудованием АТС (OLT), причем OLT вообще игнорирует длины волн «второй линейки».

Взаимодействие ONT между собой основано на применении следующего алгоритма: каждый абонентский терминал оборудован лазерным передатчиком

с перестраиваемой длиной волны $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \lambda_{N+3}, \dots, \lambda_{N+K}$ (можно использовать лазерный генератор широкого спектра совместно с фильтром Фабри – Перо) и приемником, настроенным на свою определенную длину волны [45].

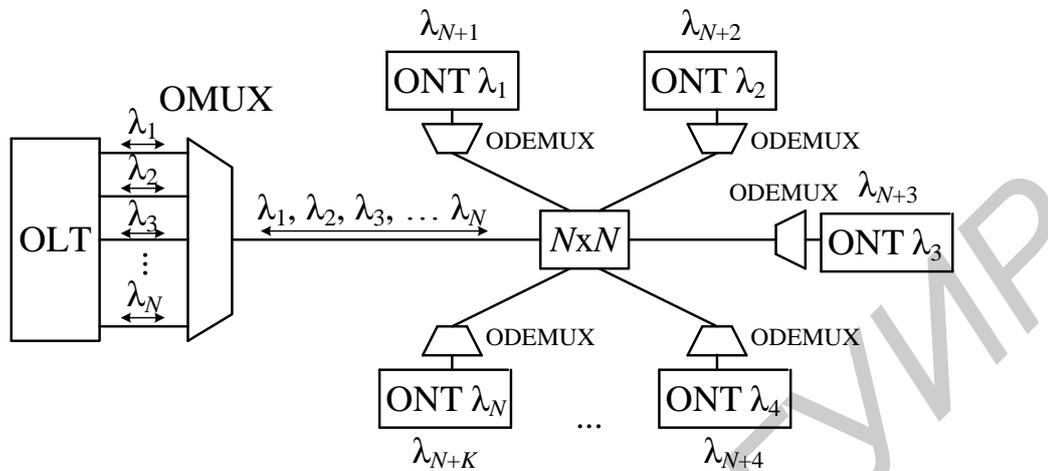


Рисунок 3.2 – Звездообразная структура сети WDM-PON

Для того чтобы отправить информационное сообщение, требуется настроить передатчик узла-отправителя на домашний канал адресата из диапазона «второй линейки» длин волн $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \lambda_{N+3}, \dots, \lambda_{N+K}$, затем передать запрос на разрешение установления соединения, дождаться разрешения и далее передавать сообщение. Чтобы выдать разрешение на возможный прием (что препятствует возникновению коллизий), каждый абонентский терминал «просматривает» все длины волн «второй линейки» в циклическом режиме до тех пор, пока не обнаруживает канал с запросом на установку соединения, содержащим свой собственный адрес (адрес приемника сообщения) [45].

В работе [10] предложена достаточно сложная математическая модель, рассматривающая всю систему в целом и требующая решения довольно сложных уравнений (для чего был использован специализированный программный пакет).

Однако можно использовать более простой способ математического моделирования для сегмента звездообразной сети PON, который позволяет описать возможные состояния каждого конкретного абонентского ONT в сети и

привести полученную модель к известной одноканальной системе массового обслуживания с отказами [35].

Упрощенно можно полагать, что каждый абонентский ONT может находиться в одном из трех состояний: S_0 – устройство свободно (например, просматривает «вторую линейку» длин волн); S_1 – устройство занято приемом сообщений от другого ONT либо OLT; S_2 – устройство занято передачей собственных сообщений к OLT или другому ONT [35].

Размеченный граф состояний отдельного взятого абонентского ONT приведен на рисунке 3.3 [35].

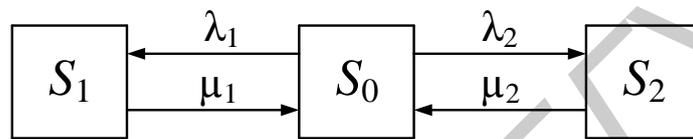


Рисунок 3.3 – Граф состояний абонентского ONT

Здесь λ_1 – интенсивность потока заявок, приходящих к данному ONT от других ONT и OLT (прием заявок, заявок/с); λ_2 – интенсивность потока заявок от данного ONT к другим ONT либо OLT (передача заявок, заявок/с); μ_1 – интенсивность потока обслуживаемых заявок от других ONT либо OLT, то есть работа на прием сообщений, $1/c$ ($\mu_1 = 1/t_{\text{прием}}$, где $t_{\text{прием}}$ – среднее время приема одного сообщения, с); μ_2 – интенсивность потока передачи заявок другим ONT либо OLT или работа на передачу сообщений, $1/c$ ($\mu_2 = 1/t_{\text{пер}}$, где $t_{\text{пер}}$ – среднее время передачи одного сообщения, с).

Для графа состояний (см. рисунок 3.3) можно составить систему из трех линейных уравнений (они называются уравнениями Колмогорова) по следующему общепринятому правилу [47]: слева в уравнениях стоит предельная вероятность данного состояния p_0 , умноженная на суммарную интенсивность всех потоков, выходящих из данного состояния, а справа – сумма произведений интенсивностей всех потоков, входящих в i -е состояние, умноженных на вероятности тех состояний, из которых эти потоки исходят [35]:

$$(\lambda_1 + \lambda_2)p_0 = \mu_1 p_1 + \mu_2 p_2; \text{ при этом } \mu_1 p_1 = \lambda_1 p_0; \quad \mu_2 p_2 = \lambda_2 p_0. \quad (3.1)$$

Здесь p_0, p_1, p_2 выражают предельные вероятности состояний S_0, S_1, S_2 . Решая эту систему с учетом нормировочного условия $p_0 + p_1 + p_2 = 1$, получим [35, 47]:

$$p_0 = \mu_1\mu_2/(\lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1 + \mu_1\mu_2); \quad (3.2a)$$

$$p_1 = \lambda_1\mu_2/(\lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1 + \mu_1\mu_2); \quad (3.2б)$$

$$p_2 = \lambda_2\mu_1/(\lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1 + \mu_1\mu_2) \quad (3.2в)$$

Стоит отметить, что величина p_0 , выражающая предельную вероятность состояния S_0 , есть не что иное, как относительная пропускная способность или вероятность того, что ONT будет свободен [35, 47].

Абсолютную пропускную способность A , сообщений/с (сколько сообщений в среднем будет обслужено (принято и передано) в единицу времени), можно определить из следующего выражения [35, 47]:

$$A = (\lambda_1 + \lambda_2) p_0. \quad (3.3)$$

Вероятность отказа в приеме/передаче сообщения $p_{\text{отк}}$ равна соответственно [35]

$$p_{\text{отк}} = 1 - p_0 = (\lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1)/(\lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1 + \mu_1\mu_2). \quad (3.4)$$

Для пояснения приведенных выражений проведем примерный расчет. По аналогии с [10] зададим исходные параметры, приближенные к реальным: пусть $\lambda_1 = 90$ заявок/с, $\lambda_2 = 10$ заявок/с. Тогда суммарная интенсивность потока заявок $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = 100$ заявок/с.

Так как каждому абоненту предоставляется своя длина волны, а скорость обмена информацией достигает 1 Гбит/с [11, 35] (то есть нет смысла ограничивать исходящую скорость в целях экономии полосы пропускания канала), примем, что $t_{\text{обсл}} = t_{\text{прием}} = t_{\text{пер}} = 1$ мс (10^{-3} с). Тогда интенсивность обслуживания будет равна величине $\mu = \mu_1 = \mu_2 = 10^3$ 1/с.

Рассчитаем основные параметры системы с учетом того, что $\mu = \mu_1 = \mu_2$ [35]:

- по формуле (3.2a) рассчитаем относительную пропускную способность ONT p_0 :

$$p_0 = \mu / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) = 10^3 / (90 + 10 + 10^3) = 0,909;$$

- по формуле (3.3) определим абсолютную пропускную способность A :

$$A = (90 + 10) \cdot 0,909 = 90,9 \text{ сообщений/с};$$

- по формуле (3.4) рассчитаем вероятность отказа в обработке заявки $p_{\text{отк}}$:

$$p_{\text{отк}} = 1 - 0,909 = 0,091;$$

- по формуле (3.2б) определим вероятность отказа по причине приема сообщения p_1 :

$$p_1 = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) = 90 / (90 + 10 + 10^3) = 0,082;$$

- по формуле (3.2в) рассчитаем вероятность отказа по причине передачи сообщения p_2 с учетом того, что $\mu = \mu_1 = \mu_2$:

$$p_2 = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \mu) = 10 / (90 + 10 + 10^3) = 0,009.$$

Для большей наглядности воспользуемся программой компьютерного моделирования MATLAB 6.5 [18] и с учетом формулы (3.2а), а также принятого ранее допущения о равенстве среднего времени приема и передачи сообщения построим графики зависимости относительной пропускной способности p_0 от среднего времени приема/передачи одного сообщения $t_{\text{обсл}}$ (рисунок 3.4, а) и от суммарной интенсивности потока заявок λ (рисунок 3.4, б) [35].

Представленные на рисунке 3.4 графики полностью отражают характер получившихся выражений: чем меньше среднее время приема/передачи сообщения (то есть выше скорость обмена информацией в системе), тем больше вероятность успешной обработки ОНТ поступившей заявки (см. рисунок 3.4, а). Соответственно, чем меньше общая интенсивность потока заявок, направленных на ОНТ, тем больше относительная пропускная способность p_0 (см. рисунок 3.4, б).

В настоящее время относительная пропускная способность узлов является ненормируемым параметром для звездообразных оптических сетей доступа. Однако очевидно, что основной задачей эффективного алгоритма управления любой сетью должно быть создание таких условий работы сегмента сети, при которых вероятность потерь пакетов (вероятность отказа в обработке заявки)

является малой величиной, а сами такие события максимально редкими. Соответственно, значение относительной пропускной способности в таком режиме работы участка сети будет стремиться к единице. Особенно важным выполнение данного условия может оказаться в сетях PON особого назначения (правительственных, военных и др.), где неприемлемы задержки в обработке информации и повторная передача пакетов.

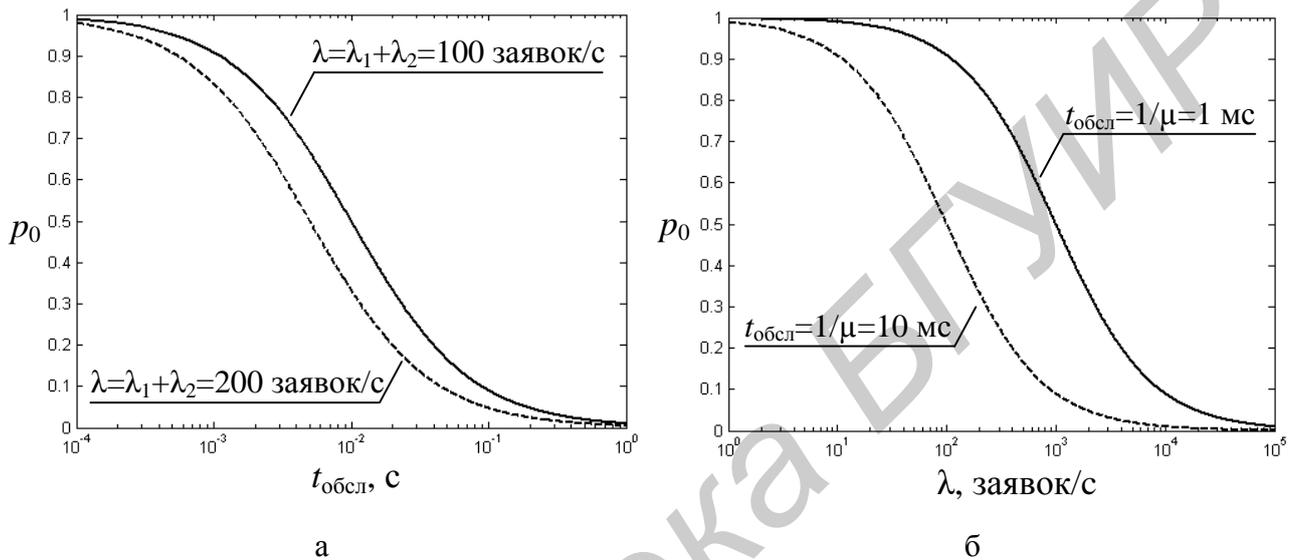


Рисунок 3.4 – Графики зависимости относительной пропускной способности p_0 от среднего времени приема/передачи одного сообщения $t_{\text{обсл}}$ (а) и суммарной интенсивности потока заявок λ (б)

В случае неудовлетворительно низкой величины относительной пропускной способности какого-либо абонентского (проблемного) ONT, как следует из графиков на рисунке 3.4, необходимо:

а) увеличить быстродействие используемых в сети PON устройств, тем самым уменьшив время на прием/передачу сообщения. Например, согласно графику на рисунке 3.4, а, для $\lambda = 100$ заявок/с и времени обработки одного сообщения $t_{\text{обсл}} = 10^{-3}$ с относительная пропускная способность $p_0 = 0,909$; если же взять $t_{\text{обсл}} = 10^{-2}$ с, то значение p_0 уменьшится практически вдвое и составит всего 0,5;

б) пересмотреть общую концепцию сети, «разгрузив» проблемный узел (то есть запретить либо ограничить второстепенным по значимости ONT передачу сообщений для действительно стратегически важного узла). Например, согласно графику на рисунке 3.4, б, для $t_{\text{обсл}} = 10^{-3}$ с и суммарной интенсивности потока заявок $\lambda = 100$ заявок/с относительная пропускная способность $p_0 = 0,909$. Если же взять $\lambda = 500$ заявок/с, то значение p_0 уменьшится и составит 0,667.

Таким образом, проведя мониторинг участка звездообразной сети PON и получив необходимые усредненные параметры сети, а также рассмотрев каждый ONT отдельно по вышеприведенной методике, можно определить относительную и абсолютную пропускную способность каждого узла, то есть оценить качество работы сети в целом и отдельного абонента в частности с учетом назначения и степени важности каждого сегмента сети PON, применяя простейшие общедоступные средства вычисления.

В зарубежной литературе, помимо TDM-PON и WDM-PON, выделяют третье направление развития пассивных волоконно-оптических сетей PON – множественный доступ с кодовым разделением каналов (CDMA-PON). Несколько пользователей могут одновременно передавать информацию по одному и тому же каналу, используя различные кодовые последовательности для передачи логических нулей и единиц. Каждый передатчик кодирует определенным кодом последовательность бит, подлежащих передаче, умножая все разряды расширяющей последовательности на значение информационного бита. На приемной стороне каждый разряд суммарного сигнала умножается на соответствующий разряд расширяющей последовательности данного канала, после чего полученные результаты суммируются в пределах первого периода последовательности. В зависимости от этого вычисляется исходный символ [83–85].

Подробный анализ систем CDMA-PON не входит в перечень вопросов, заявленных к рассмотрению в данном учебно-методическом пособии, поэтому лишь кратко выделим основные преимущества использования технологии CDMA в волоконно-оптических сетях доступа [83–85]:

- возможность организации гибкого метода множественного доступа для передачи асинхронного трафика: в зависимости от веса и длины выбранного кода можно варьировать количество пользователей сети доступа;
- перебором используемых кодов можно получить необходимую величину значения вероятности ошибок либо битовой скорости;
- отсутствие необходимости строгого управления длинами волн, как в WDM-PON;
- самомаршрутизация по кодовой последовательности: в матрице используемых в технологии CDMA кодов все строки равноудалены друг от друга в том смысле, что кодовые расстояния между ними (то есть число несовпадающих бит при сопоставлении кодов) одинаковы. Это свойство позволяет нейтрализовать чужеродные сигналы при получении результата соответствующим сравнением в приемнике;
- эффективное использование полосы пропускания;
- повышенная защищенность информации от несанкционированного доступа за счет передачи по линии связи псевдошумоподобного широкополосного сигнала.

ГЛАВА 4

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПО ПАССИВНЫМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ СЕТЯМ PON

4.1 Разработка обобщенной модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON

В начале своего использования волоконно-оптические линии связи считались неуязвимыми с точки зрения информационной безопасности, однако с течением времени это утверждение было опровергнуто. В настоящее время известны определенные способы, позволяющие злоумышленнику «перехватывать» конфиденциальную информацию: секретную правительственную, служебную и личную, финансовую или медицинскую. Особенно интересным является вопрос об уязвимости пассивных волоконно-оптических сетей PON, на основе которых в настоящее время ведется модернизация существующих и строительство новых абонентских сетей доступа.

В пособиях последних лет выпуска (например [50, 78, 81]) хотя и приводится перечень возможных угроз для абстрактной системы защиты информации, волоконно-оптические линии связи рассматриваются очень кратко и без учета особенностей волоконно-оптических сетей доступа. В опубликованных за последние годы статьях (в частности [6, 14, 16, 17, 46, 53, 67]) также отсутствует комплексный подход и систематизация сведений, касающихся проблем защиты информации именно пассивных волоконно-оптических сетей PON.

Известные варианты защиты информации в сетях PON отличаются не только степенью защиты, но и стоимостью их реализации. Этот фактор является очень важным. Существующие методики определения экономической эффективности мер по защите информации (например [13, 79]) также слишком

общие и не адаптированы к использованию при проектировании пассивных абонентских сетей доступа.

Таким образом, целью данной главы является:

- а) исследование и разработка обобщенной модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON;
- б) адаптация существующих методик определения экономической эффективности вариантов защитных мер для использования в пассивных абонентских сетях доступа.

4.1.1 Определение угроз информации, характерных для пассивных волоконно-оптических сетей PON

По цели реализации, как правило, выделяют четыре типа угроз информации [50]:

- а) нарушение конфиденциальности;
- б) нарушение доступности;
- в) нарушение достоверности;
- г) нарушение целостности.

Определим особенности угроз, характерные именно для пассивных абонентских сетей доступа PON:

– нарушение конфиденциальности («подслушивание» или перехват сообщений) становится возможным при отведении части оптической мощности злоумышленником с помощью специальных средств (см. подраздел 4.1.3);

– нарушение доступности (или отказ сервиса) проявляется при выводе злоумышленником из строя оборудования либо вводе в линию мощных световых сигналов, «заглушающих» информационные символы (см. подраздел 4.1.4) [78].

Таким образом, эти два типа угроз вполне реализуемы в сетях PON [30].

Третий тип угроз – нарушение достоверности (или спуфинг) подразумевает под собой передачу злоумышленником в сеть какой-либо информации,

например, от имени другого лица. Эту угрозу тоже можно реализовать в сетях PON. Единственный способ защиты от такого вида угроз – применение методов криптографии [20, 80] (см. подраздел 4.1.5).

Что касается четвертого типа угроз, то понятие нарушения целостности больше применимо не к среде передачи информации (например ВОЛС), а к так называемым «хранилищам» (носителям) информации: жестким дискам компьютеров, бумажным документам и др. Под целостностью понимают невозможность изменения (а также удаления) информации неуполномоченным на то субъектом [81]. Как правило, данный тип угроз неприменим к пассивным волоконно-оптическим сетям PON [35].

4.1.2 Выделение основных этапов сценария атаки на пассивные волоконно-оптические сети PON

Независимо от цели угроз информации, передаваемой по сетям PON, первым шагом так называемого сценария атаки со стороны злоумышленника является получение карты топологии сети PON. Именно поэтому необходимо строго контролировать соблюдение разграничения прав доступа работников предприятия связи к информации подобного рода [17, 30].

Вторым шагом злоумышленника будет попытка получения физического доступа непосредственно к самой линии PON [17]. В качестве средств защиты на этом этапе можно использовать: а) датчики вибраций (если волоконно-оптический кабель проложен в земле, то имеется возможность отслеживать уровень воздействия на прилегающую территорию, которое оказывает, например, проезжающий экскаватор, идущий или копающий землю лопатой человек и т. п.); б) замки с сигнализацией на распределительных шкафах; в) специальные конструкции оптических кабелей и муфт, затрудняющие их механическую разделку и т. п. [30].

Например, запатентована конструкция оптического кабеля, который содержит центральный силовой элемент в виде жгута металлических или диэлек-

трических проволок, окруженного многожильными волоконными модулями с гелиевым заполнением. При этом в кабеле имеется также контрольный газовый поток, находящийся под избыточным давлением. В случае прорыва наружного покрытия начинается утечка газа, в результате которой срабатывает сигнализация [46].

В Германии для защиты линий PON применяется специальный оптический кабель с защитной оболочкой из силовых скрученных элементов, которые при попытке скручивания или изгиба кабеля (например, с целью увеличения уровня побочного излучения) распрямляются и ломают оптическое волокно, что сигнализирует о попытке несанкционированного доступа к информации [46].

Третий шаг сценария атаки на сеть доступа PON – непосредственное осуществление одного из первых трех, рассмотренных в подразделе 4.1.1, типов угроз [35]. Каждый из них требует самостоятельного анализа.

4.1.3 Нарушение конфиденциальности в сетях PON: классификация механизмов реализации и защиты

Нарушение конфиденциальности передаваемой информации возможно осуществить при отведении части оптической мощности с помощью специальных средств. По способу отведения оптической мощности можно выделить два типа угроз [30]:

1. Отведение оптической мощности с **разрывом** волоконно-оптической линии и использованием волоконно-оптической вставки (рисунок 4.1) [53]. Установка волоконно-оптической вставки происходит при разрыве оптоволокна и замыкании оптического канала через оптоволоконную вставку путем соединения волокон сварным, клеевым или механическим способом. Возвратные и прямые потери оптической мощности при таком подсоединении минимальны, однако на время установки оптоволоконной вставки доступ абонента к любым услугам невозможен.

Это позволяет сигнализировать об аварийном состоянии линии либо оборудования. При этом обслуживающий персонал должен быть внимательным и реагировать оперативно, поскольку время выполнения, например, вводимого сварного соединения для получения минимальных прямых потерь составит примерно 1,5 мин, а на выполнение клеевого либо механического соединения понадобится всего около 30 с (однако прямые потери при этом несколько возрастут) [16].

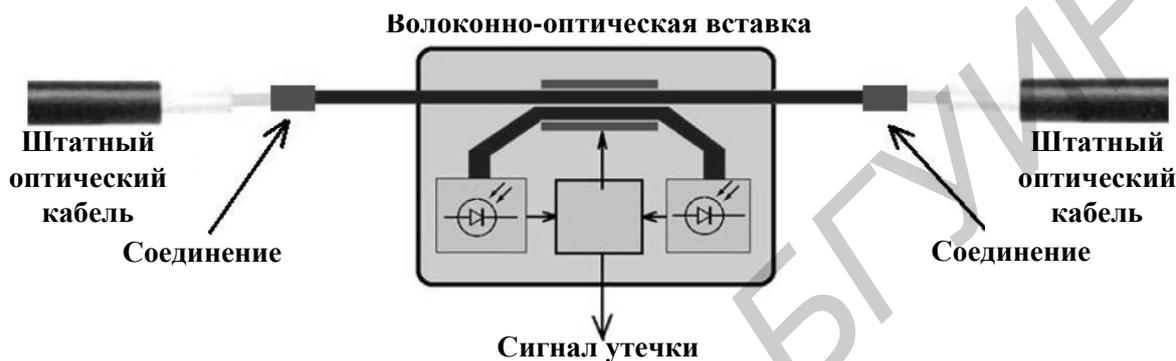


Рисунок 4.1 – Применение волоконно-оптической вставки

2. Отведение оптической мощности **без разрыва** волоконно-оптической линии. Здесь возможны следующие варианты:

а) изменение угла падения (нарушение полного внутреннего отражения за счет механического воздействия: изгиб, кручение, растяжение) [53];

б) изменение отношения коэффициентов преломления n_2/n_1 при воздействии внешнего физического поля (например, акустического либо электромагнитного) [53];

в) применение метода оптического туннелирования (то есть захвата части излучения, выходящего за пределы основного световода, другим световодом с более высоким коэффициентом преломления) [16].

Последний способ перехвата информации является наиболее опасным, так как не вносит обратного рассеянного и отраженного излучений (поэтому его трудно обнаружить) и позволяет регулировать мощность утечки, особенно при промышленном изготовлении (рисунок 4.2) [16].



Рисунок 4.2 – Применение метода оптического туннелирования

В качестве **способов защиты** (обнаружения места повреждения/утечки сигнала) применяют **измерительные способы**, которые можно разделить на три группы в зависимости от **вида измеряемого параметра**: а) принятой оптической мощности; б) спектра оптического сигнала; в) отраженной оптической мощности [30]. Рассмотрим эти варианты поочередно.

Измерение оптической мощности. Суть этого способа заключается в отслеживании уровня мощности принимаемого широкополосного сигнала и сравнении его с некоторым ожидаемым пороговым значением [6]. При этом можно определить, «прослушивают» ли линию (отбирают ли часть мощности полезного сигнала). Однако в случае «заглушения» полезного информационного сигнала введенным сигналом злоумышленника скорее всего на приемной стороне произойдет не уменьшение, а даже увеличение мощности сигнала или она останется практически постоянной [6].

Кроме того, при измерении оптической мощности или затухания в сетях PON необходимо учесть некоторые **специфические особенности**, характерные именно для этих сетей [30]:

1. При передаче в сети PON широкополосного телевизионного сигнала на длине волны 1550 нм, как правило, используются передатчики с достаточно большим уровнем выходной мощности (до 20 дБм). Однако традиционные оптические измерители мощности рассчитаны на излучатели, устанавливаемые в типовых телекоммуникационных системах (с уровнем около 3 дБм) [22, 23]. Попытка обнаружить такими измерителями более мощный сигнал приведет либо к ошибочным результатам (фотодетектор выйдет из линейного режима),

либо даже к повреждению самого фотодиода измерителя. Следовательно, необходимо использовать **модификации** оптических измерителей мощности, специально предназначенные для измерений таких высоких уровней.

2. Измерения оптической мощности на выходе передатчика и на входе приемника, а также общего затухания в линейном тракте сети PON нужно проводить на трех длинах волн: 1310, 1490 и 1550 нм. Однако обычные оптические измерители мощности, как правило, рассчитаны на длины волн 1310 и 1550 нм. И хотя в таких приборах используются широкополосные фотодетекторы, детектирование оптической несущей с длиной волны 1490 нм измерителем, настроенным на длину волны 1550 нм, может привести к ошибке до 0,5 дБ [22, 23]. Это связано с тем, что значение уровня принимаемой мощности калибруется в измерителях мощности именно на длине волны 1550 нм. Поэтому лучше всего использовать специальные тестеры PON-сетей, которые могут проводить измерения на всех трех длинах волн, причем одновременно.

3. Каждый абонентский терминал (ONT) подключается к сети посредством одного волокна [41], причем излучатель ONT работает, как правило, только при получении служебных сигналов от стационарного терминала (OLT). Следовательно, невозможно измерить мощность излучателя ONT, подключив к нему непосредственно измеритель мощности. Возможно только подключение измерителя мощности, работающего «на проход», так как только в этом случае до ONT доходит с OLT сигнал, разрешающий передачу. Поэтому необходимо использовать измерители мощности, адаптированные для PON-сетей.

Такие измерители помимо окончательного подключения к линии позволяют реализовывать «проходное» подключение путем выведения части излучения (например на изгибе) и его детектирование на калиброванных длинах волн в режиме реального времени (вносимое таким тестером затухание составит около 1,5–2,0 дБ) [67, 70].

Также при измерении мощности излучателя ONT следует иметь в виду, что при временном разделении каналов в обратном потоке (при передаче запро-

сов от ONT к OLT – см. [41]) каждому ONT предоставляется только короткий временной интервал для передачи сигналов к OLT. Именно в течение этого интервала и должна быть измерена оптическая мощность ONT.

Обычные измерители мощности показывают среднее интегрированное значение уровня мощности за определенный временной интервал. Поэтому на выходе работающего ONT измеритель покажет значение, которое будет на 20–30 дБ ниже реальной величины.

В качестве решения этой проблемы можно использовать измерители оптической мощности с пиковыми детекторами, для которых не будет иметь значение длительность передаваемых посылок. Однако такие приборы более чувствительны к шуму в канале и, соответственно, будут иметь несколько более высокую погрешность измерений [67, 70].

4. Измерение затухания в оптическом линейном тракте, как правило, проводят в двух встречных направлениях. Это обусловлено тем, что, во-первых, соединение волокон с несколько отличающимися параметрами (показатели преломления, числовая апертура, диаметр сердцевины, диаметр модового поля) приводит к различным условиям прохождения света в разных направлениях; во-вторых, затухание пассивных компонентов PON (разветвителей) также будет несколько отличаться в зависимости от направления передачи сигналов. В большинстве реальных сетей отличие затуханий для встречных направлений передачи составляет около 0,5–1,0 дБ [22, 23, 75]. С учетом всего вышесказанного, становится очевидной необходимость использования измерителей мощности, специально адаптированных для сетей PON.

Анализ оптического спектра принимаемых сигналов (второй вариант обнаружения места перехвата). Он позволяет определить **изменение в спектре** оптического сигнала, даже если суммарная мощность принимаемого сигнала остается неизменной [6].

Метод анализа оптического спектра позволяет обнаруживать «заглушения», которые воздействуют на оптический спектр сигнала и деформируют его,

однако с помощью этого метода невозможно определить наличие «подслушивания», кроме случаев, когда отбор мощности сигнала вносит заметное искажение в передаваемый сигнал (например, спектр принимаемого сигнала оказывается существенно шире, чем должен быть) [16].

Измерение особенностей оптического сигнала по отраженной оптической мощности с помощью рефлектограмм (третий способ обнаружения угрозы нарушения конфиденциальности).

Общий принцип работы оптического рефлектометра (OTDR) заключается в том, что он посылает световые импульсы, которые отражаются от неоднородностей показателя преломления волокна (рэлеевское рассеяние) или от локальных неоднородностей в линейном тракте (сварные или разъёмные соединения и вставки, деформации волокон и т. п.). В результате часть излучаемого импульса возвращается обратно и через разветвитель попадает на чувствительный детектор прибора. Измерение временного интервала между моментами излучения импульса и прихода отраженного сигнала позволяет определить расстояние от точки ввода импульса в оптический канал до неоднородности в нем.

Рэлеевское рассеяние происходит в каждой точке оптического волокна, и измерением уровня этого рассеяния можно определить затухание светового сигнала при его распространении по волокну [16]. Френелевское отражение возникает в местах границы раздела сред, например, при обрыве волокна, в местах установки разъёмов. На рефлектограмме (рисунок 4.3) это отражение будет изображаться в виде всплеска сигнала, что соответствует значительно большей мощности отраженного сигнала, чем при рэлеевском рассеянии [14, 67].

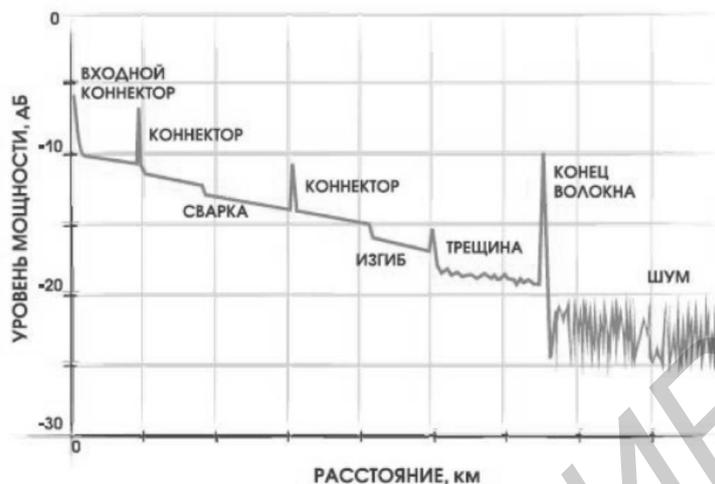


Рисунок 4.3 – Рефлектометр и обобщенная рефлектограмма

Отметим **основные характеристики рефлектометра**, существенные с точки зрения применения в пассивных оптических сетях PON [30]:

1. Большой динамический диапазон: динамический диапазон OTDR должен превосходить допустимые потери PON с ощутимым запасом, чтобы обеспечить измерение соединения из конца в конец.

2. Короткие мертвые зоны, что очень важно, когда некоторые элементы в PON и соответствующие им события на рефлектограмме близко расположены. Мертвая зона характеризует временное «ослепление» фотодетектора при попадании на него большой отраженной мощности, особенно от разъемных соединений, и представляет собой минимальное расстояние между двумя соседними отражающими неоднородностями, обнаруживаемыми с помощью рефлектометра (см. рисунок 4.3) [54].

3. При проведении измерений необходимо тестировать PON на длинах волн 1310, 1490 и 1550 нм.

4. Необходимо обеспечить высокую линейность и большое время усреднения для точных измерений сетей, содержащих большие потери на сплиттере 1x32 (см. [41]).

5. Необходимо иметь в рефлектометре (OTDR) конфигурационные настройки, чтобы позволить пользователю устанавливать соответствующие пороговые значения для отличия отражений от разветвителей и от конца волокна.

Таким образом, рефлектометр с правильно выбранными характеристиками позволяет: а) обнаружить «подслушивание» (при «подслушивании» злоумышленник производит некоторые действия над оптическим волокном, что отражается на рефлектограмме); б) определить широкополосный «заглушающий» сигнал, входящий или не входящий в спектр информационных сигналов (его часть попадает за счет отражения на неоднородностях в рефлектометр и наблюдается на рефлектограмме) [30].

4.1.4 Нарушение доступности в сетях PON: определение и анализ живучести абонентских сетей доступа PON

При рассмотрении различных вариантов построения абонентских сетей доступа, основанных на технологии пассивных оптических сетей PON, одним из определяющих критериев является живучесть сети, показывающая в численном виде способность сети продолжать нормально функционировать после вредного воздействия злоумышленника, которое направлено на нарушение доступности (например, при попытке вызвать угрозу отказа сервиса с помощью разрыва ВОЛС). В статье [64] проведено исследование живучести сетей основных стандартных топологий (линейная, звездообразная и кольцевая сети), причем узел считался выжившим, если был связан с каким-либо другим узлом (хотя бы одним). «Одинокие» узлы, отделенные от остальной сети после разрыва ВОЛС и не передающие/принимающие сообщения, во внимание не принимались. В работе [66], опирающейся на статью [64], предлагается проводить анализ живучести пассивных волоконно-оптических сетей PON по показателю средней относительной длины пути (СОДП). Автор этой работы вполне справедливо предлагает считать оптические разветвители (сплиттеры) транзитными узлами, осуществляющими только разделение потока оптического излучения

между абонентскими узлами, и приводит теоретически верные выкладки для определения живучести сети согласно выбранной методике.

Однако, по нашему мнению, полученные результаты справедливы только для стандартных сетей с топологией «звезда» и не в полной мере учитывают специфику пассивных сетей PON. Например, из приведенных в [66] графиков зависимости показателя живучести сети D от размера сети (числа конечных устройств N) следует, что живучесть сети возрастает и стремится к единице с ростом числа узлов как для «звезды», так и для «дерева».

Но если это вполне очевидно для «звезды», то у топологии «дерево» для PON есть свои особенности, связанные с тем, что абонентские оптические сетевые терминалы ONT не могут взаимодействовать между собой напрямую, а связываются только с оптическим линейным терминалом OLT [41]. Следовательно, к выжившим можно причислять только те узлы, которые не потеряли свою связь с OLT при разрыве волоконных линий связи сети PON. Узлы же, подключенные, например, к одному и тому же сплиттеру, но не связанные с OLT, можно считать «одинокими» – обмениваться сообщениями между собой они не могут.

Таким образом, можно утверждать, что **живучесть сети PON D** должна определяться как отношение числа выживших (и не потерявших связь с OLT при разрыве ВОЛС) абонентских устройств ONT к общему числу ONT [27]. Это обстоятельство заставляет пересмотреть изложенную в [66] методику расчета живучести применительно к пассивным сетям PON и вариантам их построения.

На рисунке 4.4 представлена пассивная оптическая сеть PON с топологией «звезда». Данная топология характеризуется минимальным количеством оптических разветвителей, размещенных в одном месте – головном офисе, причем она применяется при плотном расположении абонентских узлов (иначе реализация данной топологии будет сопряжена с неоправданными материальными затратами) [70].

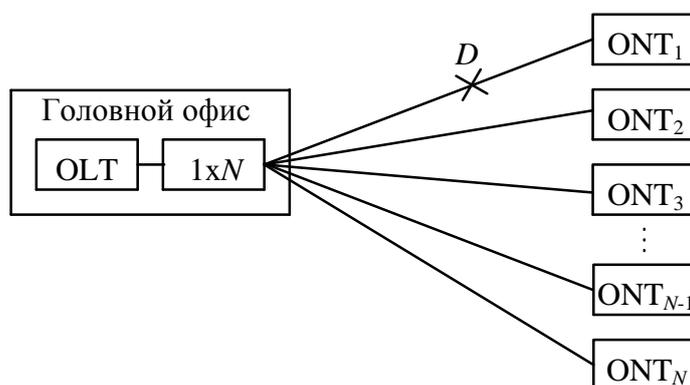


Рисунок 4.4 – Топология сети PON «звезда»

Предположим, что с какой-то вероятностью p в сети будет оборвана одна линия связи, например в точке D , как это показано на рисунке 4.4. Очевидно, что общее число абонентских ONT будет равняться кратности сплиттера и составит N штук. Причем, какая бы из линий не была оборвана, связи с OLT лишится только один ONT, то есть число выживших абонентских терминалов составит $(N-1)$ штук. Тогда по определению, данному ранее, живучесть сети PON в описываемой ситуации составит [27]

$$D_D = \frac{N-1}{N}. \quad (4.1)$$

Теперь проанализируем топологию «дерево» PON (рисунок 4.5). Данная топология характеризуется наличием нескольких оптических разветвителей и различными местами их установки, она применяется при разнесенном расположении абонентов, обладает гибкостью с точки зрения потенциального развития и удобством расширения абонентской базы [70, 75].

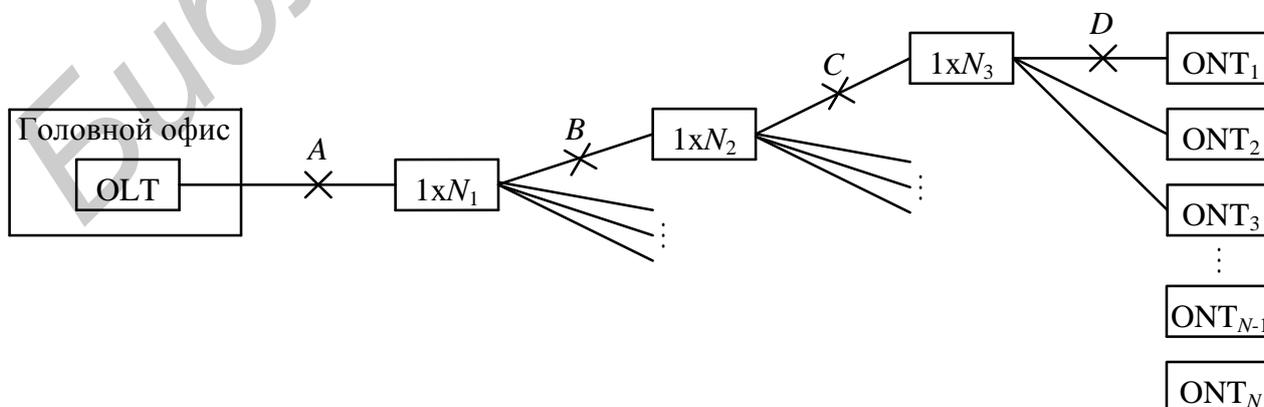


Рисунок 4.5 – Топология сети PON «дерево»

Рассмотрим наиболее общий случай с использованием трех каскадов (ступеней) сплиттеров с кратностями N_1 , N_2 и N_3 соответственно (как правило, большее число каскадов на практике не используют, так как «бюджет мощности» топологии «дерево» PON ограничен). Примем для удобства сравнения с топологией «звезда» общее число абонентских ONT равным N штук. Очевидно, что

$$N = N_1 N_2 N_3. \quad (4.2)$$

В данном случае можно выделить четыре участка, разрыв линий связи на которых будет иметь существенно различные последствия. Так, разрыв в точке A (см. рисунок 4.5) приведет к тому, что не выживет ни один абонентский терминал; в точке B – выживет $N_2 N_3 (N_1 - 1)$ ONT, в точке C – $N_3 (N_1 N_2 - 1)$ ONT, в точке D – $(N_1 N_2 N_3 - 1) = (N - 1)$ ONT [28]. Тогда живучесть «дерева» PON при разрыве ребра на участке A равна нулю: $D_A = 0$;

на участке B –

$$D_B = \frac{N_1 - 1}{N_1}; \quad (4.3)$$

на участке C –

$$D_C = \frac{N_1 N_2 - 1}{N_1 N_2}; \quad (4.4)$$

а на участке D совпадает с формулой (4.1) [27, 28].

Для большей наглядности приведем гистограммы зависимости живучести D от вида топологии сети PON и кратности сплиттеров, используемых на различных ступенях «дерева» PON (рисунок 4.6) [27].

Как видно из рисунка 4.6, меньший урон сети PON будет нанесен при использовании топологии «звезда» или при разрыве ближайшей к ONT линии связи в топологии «дерево» (точка D на рисунке 4.5). При разрыве линии связи в точке B дереву PON будет нанесен более значительный урон, однако его можно повысить увеличением кратности сплиттера N_1 (см. формулу (4.3)) при одинаковом общем числе абонентских терминалов ONT [29].

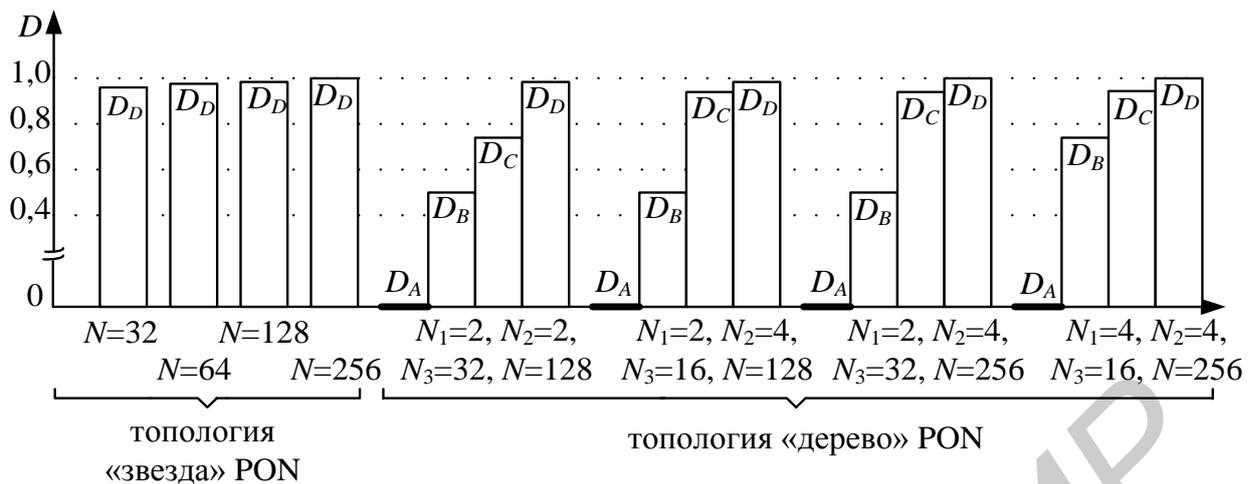


Рисунок 4.6 – Гистограммы живучести сетей PON

Наиболее критичным участком для «дерева» PON является участок от OLT до первого сплиттера (точка A) [27, 29]. Поэтому помимо так называемых «физических» средств защиты (датчиков вибраций, специальных конструкций волоконно-оптических кабелей, затрудняющих их механическую разделку, и др. (см. подраздел 4.1.2)) целесообразно применять **фидерное резервирование** данного участка (рисунок 4.7) [29, 66].

Преимущества такого варианта очевидны: для того чтобы получить полный обрыв резервируемого участка, необходимо разорвать три линии связи – в точках A_1 , A_2 и A_3 . По теории вероятностей [47], с учетом того что вероятность разрыва одного ребра принята равной p , вероятность одновременного разрыва трех ребер составит p^3 , причем очевидно, что $p^3 \ll p$, так как $0 < p < 1$ [27, 28].

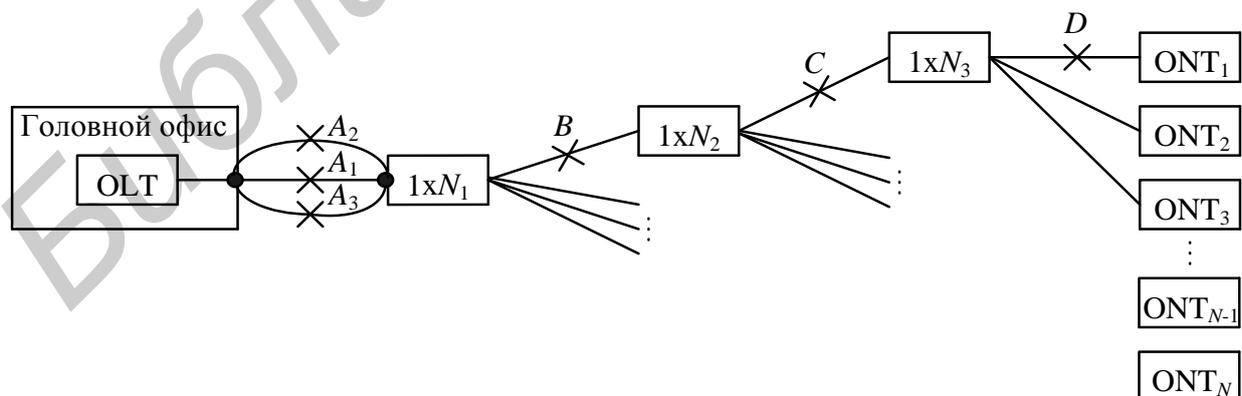


Рисунок 4.7 – Фидерное резервирование «дерева» PON

Таким образом, расчет живучести сетей PON (то есть степени уязвимости того или иного участка сети PON к нарушению доступности) следует производить еще на этапе планирования сети. При этом необходимо гибко подходить к вопросам резервирования и защиты от доступа посторонних лиц участков сети в зависимости от ее назначения (степени важности передаваемой по ней информации) и условий прокладки (возможность проведения различных земляных работ и т. п.), учитывая соотношение стоимости защитных мер и возможного денежного ущерба от реализации угрозы отказа сервиса.

4.1.5 Нарушение достоверности в сетях PON: анализ и классификация криптографических методов защиты

Криптографические средства защиты информации являются единственными эффективными мерами при борьбе с нарушением достоверности передаваемой информации (спуфингом): позволяют бороться с нарушением конфиденциальности (перехватом сообщений, «подслушиванием») в тех случаях, когда измерительные методы не способны выявить злоумышленника (например, при использовании оптического туннелирования) [16, 20, 80].

В современной литературе выделяют два типа криптосистем: симметричные (традиционное шифрование) и асимметричные (шифрование с открытым ключом) [20]. В симметричных криптосистемах используется один алгоритм с одним и тем же ключом для шифрования и дешифрования, причем отправитель и получатель должны иметь этот ключ и хранить его в секрете. В асимметричных системах для шифрования и дешифрования также используется один алгоритм, но два ключа: открытый – для шифрования (может быть доступен любому пользователю в системе), закрытый – для дешифрования (доступен только получателю сообщения и должен храниться в секрете) [20].

Казалось бы, обе эти системы обладают идеальной защищенностью, однако это не так. Рассмотрим подробнее традиционное шифрование, когда, как было сказано, отправитель и получатель должны иметь общий секретный ключ.

Однократная его передача (например, при личной встрече, когда обеспечена полная аутентификация участников обмена и невозможен перехват ключа злоумышленником) и дальнейшая работа **только с этим единственным** ключом дают злоумышленнику время на использование всех имеющихся у него вычислительных ресурсов (в теории – бесконечных) и определение путем проб как самого ключа, так и секретного алгоритма.

Считается, что только так называемый «разовый» секретный ключ, длина которого равна (или больше) длине сообщения, позволяет достигнуть безусловной защищенности [65]. Иными словами, для увеличения стойкости криптосистемы секретный ключ необходимо часто менять (обычно ключ меняют от сеанса к сеансу или после передачи определенного объема информации).

Таким образом, взаимодействующим сторонам необходим защищенный канал, по которому они могли бы обмениваться секретными ключами (так называемая «проблема распределения ключа»), причем делать это должны только реальный отправитель и получатель (так называемая «проблема аутентификации») [80].

Считается, что асимметричные системы могут решать проблемы симметричных систем благодаря использованию математических алгоритмов, основанных на специального вида функциях, когда вычисление функции в одном направлении не представляет трудностей, а нахождение обратной функции занимает огромное количество вычислительных ресурсов [65].

Предположим, что получатель обладает закрытым ключом. Используя функцию такого рода, он с легкостью генерирует открытый ключ и помещает его в свободный доступ. Восстановление же злоумышленником закрытого ключа по общедоступному открытому ключу затруднено. При смене ключей получатель изменяет свой закрытый ключ, выбирает схожий математический алгоритм и заново сообщает возможным отправителям открытые ключи. Следовательно, можно сказать, что проблема «распределения ключа» решена: за-

крытый ключ, который должен храниться в секрете, никогда не покидает своего владельца.

Если же в процессе шифрования-дешифрования использовать две пары закрытых и открытых ключей, то можно решить и так называемую «проблему аутентификации»: с помощью своего закрытого ключа отправитель сначала шифрует все сообщение либо его часть (так называемый «аутентификатор»), затем повторяет шифрование сообщения с помощью открытого ключа из пары получателя. Получатель, в свою очередь, расшифровывает с помощью своего закрытого ключа все сообщение, а потом непосредственно и сам аутентификатор с помощью открытого ключа отправителя убеждается в том, что отправитель реален [20].

Однако, несмотря на все математически очевидные преимущества, защищенность асимметричных систем основывается только на относительно медленном развитии технического прогресса. Например, стойкость наиболее распространенных криптографических систем с открытыми ключами основывается на том, что факторизация больших чисел требует экспоненциального по числу знаков факторизуемого числа N операций. Это значит, что увеличение разряда числа на один (прибавление еще одной цифры к факторизуемому числу) умножает время, необходимое для факторизации на фиксированный множитель. При увеличении разрядов числа задача быстро становится вычислительно не решаемой [20].

Но вместе с тем ожидается появление и доступность сверхмощных квантовых компьютеров, для которых уже разработаны алгоритмы быстрой факторизации [65]. Следовательно, системы шифрования с открытым ключом могут потерять свою эффективность. Поэтому возникла потребность в криптографических системах, основанных на принципах, отличных от математических. В качестве примера такой системы, базирующейся на физических закономерностях, можно привести квантовую криптографию [3].

Прежде всего системы квантовой криптографии ориентированы на создание абсолютно защищенного канала для распределения ключа и разделяются на два направления: кодирование квантового состояния одиночной частицы и квантовое перепутывание (запутывание) фотонов [65].

Защищенность первого направления основывается на теореме о запрете клонирования неизвестного квантового состояния, то есть на невозможности создания точной копии неизвестного квантового состояния без воздействия на исходное состояние [3].

Суть квантового перепутывания фотонов заключается в следующем: две квантово-механические системы (в том числе и разделенные в пространстве) могут находиться в состоянии корреляции, так что измерение выбранной величины одной системы определит результат измерения этой величины другой системы [65].

Выделим основные направления оптимизации систем квантовой криптографии [37]:

а) в первую очередь ученые-исследователи стремятся увеличить так называемые **«физические» параметры** систем квантовой криптографии, а именно протяженность волоконно-оптической линии связи, по которой осуществляется распределение секретного ключа [20];

б) другим не менее важным направлением является **разработка модифицированных протоколов кодирования**, направленных на уменьшение количества полезной информации, которую теоретически может получить злоумышленник, но в то же время на увеличение значения ошибки, вызванной действиями нарушителя, на приемной стороне [48, 59];

в) третьим направлением оптимизации волоконно-оптических систем квантовой криптографии является переход от систем «точка – точка» (то есть «отправитель – получатель») к **древовидной топологии «точка – многоточка»** (то есть «отправитель – несколько получателей»), что становится особенно

актуальным в связи с повсеместным развертыванием пассивных сетей доступа PON в качестве абонентской «последней мили» [22, 23, 75].

Общеизвестно, что обычный многофотонный импульс при передаче по сети PON, проходя через пассивный сплиттер, «расщепляется» таким образом, что ослабленная по мощности копия входного импульса появляется на каждом из выходов сплиттера [80].

Однако поведение одиночных фотонов подчиняется вероятностным законам: очевидно, что переданный отправителем единичный фотон не может быть разделен или скопирован, но может появиться (с некоторой вероятностью) на одном из выходов сплиттера (то есть его получит только один из получателей). Таким образом, для того чтобы несколько пользователей получили по уникальному секретному ключу, отправителю достаточно послать обычную двоичную последовательность бит, затем на открытом сеансе обсуждения выяснить, какой разряд (какой по счету фотон) попал к какому именно получателю [4].

Для пассивных волоконно-оптических сетей PON и систем квантовой криптографии также можно выделить свои направления оптимизации [37]:

- 1) повышение скорости распределения квантового ключа с помощью установки сплиттера, в отличие от традиционных древовидных схем сетей PON, непосредственно у отправителя (сеть превращается в звездообразную). В этом случае интенсивность импульса лазера-передатчика подбирается таким образом, чтобы получалось как бы несколько стандартных линий «точка – точка», а сплиттер можно было не учитывать. Среди основных недостатков данного решения выделяют возрастание количества оптического волокна, необходимого для прокладки, и увеличение вероятности перехвата злоумышленником секретного ключа [4, 59, 65];

- 2) повышение скорости распределения ключа и избавление от подслушивания, если сплиттер находится непосредственно у отправителя, с помощью применения вместо обычных пассивных сплиттеров активных оптических пе-

реключателей, способных «подключать» отправителя к любому из получателей, создавая тем самым временные каналы «точка – точка» [4, 65];

3) распределение квантовых ключей непосредственно между получателями напрямую, минуя отправителя (применение спектрального разделения каналов WDM и разветвителей типа $N \times N$, см. главу 3) [59].

Таким образом, можно полагать, что исследование систем квантовой криптографии (в частности, систем распределения квантовых ключей в сетях доступа PON) является довольно перспективным направлением, позволяющим практически полностью нейтрализовать угрозу нарушения достоверности передаваемой информации в волоконно-оптических сетях связи [37].

4.1.6 Блок-схема модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON

С учетом всего изложенного в подразделах 4.1.1–4.1.5 (основных этапов реализации атаки на сети PON, типов угроз, методов борьбы с ними, а также полученных классификаций) составим блок-схему модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON (рисунок 4.8) [30, 37].

Все этапы сценария атаки и соответствующие им методы защиты связаны между собой, при этом применение только одного из вариантов защиты не может гарантировать стопроцентную защиту информации. Однако необходимо понимать, что использование всего комплекса защитных мероприятий на каждой «ветви дерева» PON очень затратно и абсолютно неоправданно. Поэтому принципы построения сетей абонентского доступа PON должны анализироваться в зависимости от назначения и степени важности передаваемой информации (сети государственного значения, военных ведомств, организаций; домашние сети и т. д.). Согласно такому разделению и должен выбираться экономически оправданный комплекс защитных мер [30].

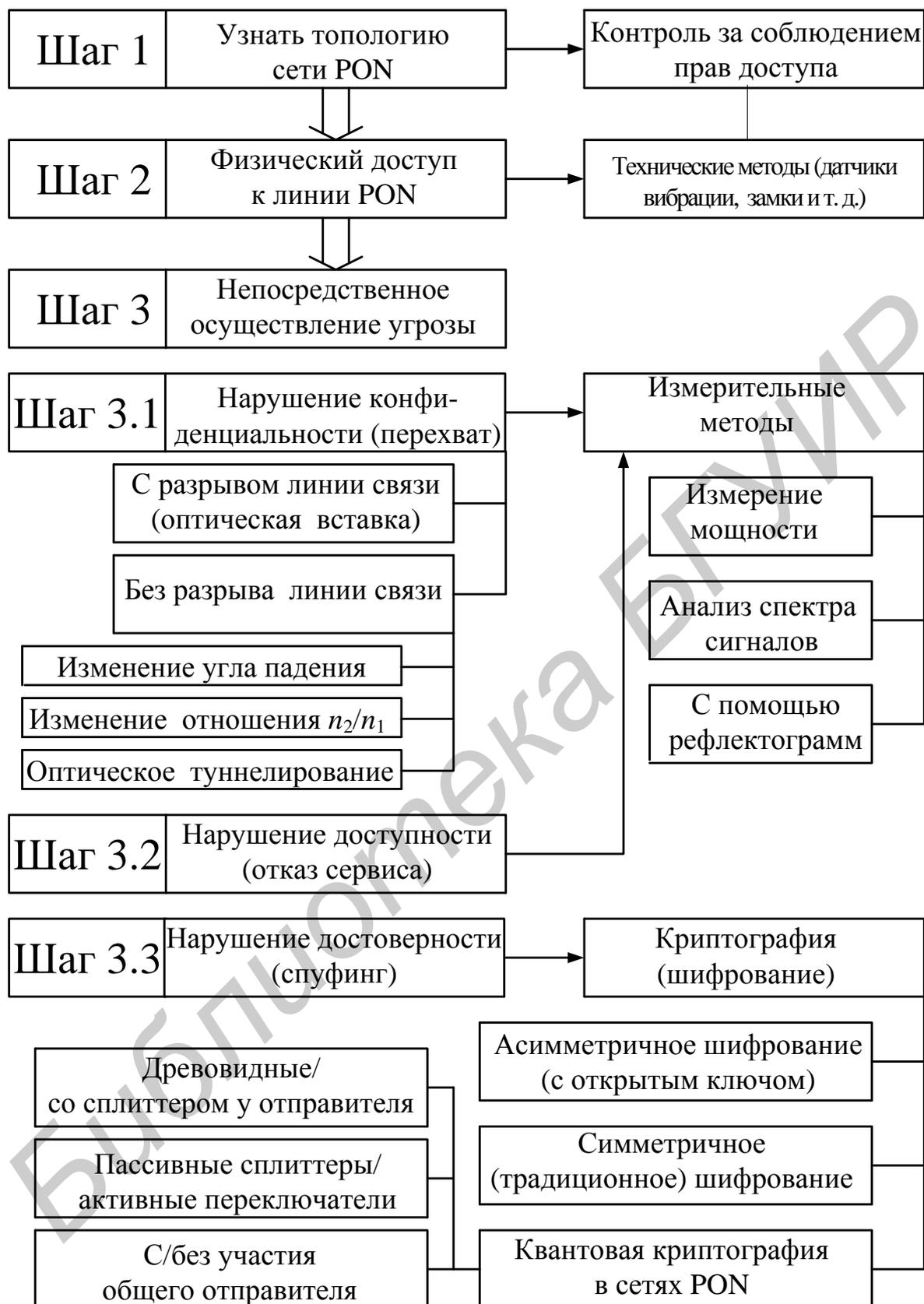


Рисунок 4.8 – Обобщенная модель сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON

4.2 Разработка алгоритма расчета экономической эффективности защиты информации в сетях PON

Обобщив методики, приведенные в [1, 13, 79], и конкретизировав их в соответствии с полученной моделью сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON (см. рисунок 4.8), можно предложить методику определения экономической эффективности защиты информации в сетях PON.

Пусть для сети доступа PON экспертами даны следующие параметры [24]:

1. Стоимость организации ряда **защитных мер** (усл. ед.):
 - а) контроля соблюдения прав доступа d_1 ;
 - б) оснащения линий PON техническими средствами d_2 ;
 - в) оснащения сети измерительными средствами d_3 ;
 - г) криптографической защиты передаваемых данных d_4 .
2. Потенциальная **величина ущерба** при совершении каждой из трех возможных **угроз** (усл. ед.):
 - а) конфиденциальности u_1 ;
 - б) доступности u_2 ;
 - в) достоверности u_3 ;
3. Вероятность перехода злоумышленника к следующему этапу сценария атаки либо к осуществлению самой угрозы при:
 - а) несоблюдении прав доступа p_1 ;
 - б) отсутствии технических средств защиты p_2 ;
 - в) отсутствии измерительных средств защиты p_3 ;
 - г) отсутствии криптографических средств защиты p_4 .

Как видно из рисунка 4.8, нарушение конфиденциальности или доступности наступит при одновременной успешной реализации злоумышленником трех этапов сценария атаки с вероятностями p_1 , p_2 и p_3 (см. пункт 3, а–в), а нарушение достоверности – при одновременной успешной реализации злоумышленни-

ком трех этапов сценария атаки с вероятностями p_1 , p_2 и p_4 (см. пункт 3, а, б, г) [30]. По теореме умножения вероятностей для независимых событий [47, 74] вероятность осуществления угрозы в первом случае составит $(p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)$, во втором – $(p_1 \cdot p_2 \cdot p_4)$.

Далее определим **вероятную стоимость общей величины ущерба** u [13, 24], усл. ед.:

$$u = u_1 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 + u_2 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 + u_3 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_4, \quad (4.5)$$

где первое слагаемое $(u_1 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)$, второе слагаемое $(u_2 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)$ и третье слагаемое $(u_3 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot p_4)$ есть не что иное, как вероятные стоимости величины ущерба из-за успешного нарушения конфиденциальности, доступности и достоверности соответственно.

По формуле полной вероятности [47, 74] вероятность того, что угрозы нарушения конфиденциальности или доступности не будут осуществлены, составит $(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3)$, а вероятность неосуществления угрозы нарушения достоверности – $(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_4)$.

Однако избежать угрозы **нарушения конфиденциальности** или **доступности** возможно только в случае **оснащения** сети PON **защитными средствами**, перечисленными в пункте 1, а–в (то есть потратив $(d_1 + d_2 + d_3)$ усл. ед.); избежать угрозы **нарушения достоверности** – защитными средствами, перечисленными в пункте 1, а, б, г (то есть потратив $(d_1 + d_2 + d_4)$ усл. ед.).

Тогда вероятная **стоимость защитных средств** d составит, усл. ед. [13, 24]:

$$d = (d_1 + d_2 + d_3) \cdot (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) + (d_1 + d_2 + d_3) \cdot (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3) + (d_1 + d_2 + d_4) \cdot (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_4). \quad (4.6)$$

Как правило, о целесообразности применения выбранной системы защиты информации начинают говорить, если вероятная стоимость величины ущерба превышает вероятную стоимость защитных средств $(u > d)$ [1, 79].

Для большей наглядности приведем пример расчета экономической эффективности защиты информации в сети PON. В качестве исходных данных

предположим, что по аналогии с сетями PON схожего профиля экспертами даны следующие оценки [24]:

1. Стоимость организации защитных мер (усл. ед.):

- а) контроля соблюдения прав доступа $d_1 = 100\ 000$;
- б) оснащения линий PON техническими средствами $d_2 = 25\ 000$;
- в) оснащения сети измерительными средствами $d_3 = 50\ 000$;
- г) криптографической защиты передаваемых данных $d_4 = 80\ 000$;

2. Потенциальная величина ущерба при совершении каждой из трех возможных угроз (усл. ед.):

- а) конфиденциальности $u_1 = 150\ 000$;
- б) доступности $u_2 = 100\ 000$;
- в) достоверности $u_3 = 200\ 000$;

3. Вероятность перехода злоумышленника к следующему этапу сценария атаки либо к осуществлению самой угрозы при:

- а) несоблюдении прав доступа $p_1 = 0,85$;
- б) отсутствии технических средств защиты $p_2 = 0,91$;
- в) отсутствии измерительных средств защиты $p_3 = 0,95$;
- г) отсутствии криптографических средств защиты $p_4 = 0,93$.

По формуле (4.5) определим вероятную стоимость величины ущерба u , усл. ед.:

$$u = 150\ 000 \cdot 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95 + 100\ 000 \cdot 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95 + 200\ 000 \cdot 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,93 = 327\ 577,26 \text{ усл. ед.}$$

По формуле (4.6) рассчитаем вероятную стоимость защитных средств d , усл. ед.:

$$d = (100\ 000 + 25\ 000 + 50\ 000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95) + (100\ 000 + 25\ 000 + 50\ 000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95) + (100\ 000 + 25\ 000 + 80\ 000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,93) = 150\ 343,48 \text{ усл. ед.}$$

Как видно из результатов расчета, вероятная стоимость величины ущерба более чем в два раза превышает вероятную стоимость защитных средств

($u = 2,18d$), то есть при данных оценках экспертов полный комплекс защитных мер вполне оправдан.

Если же, к примеру, эксперты дадут заключение, что у злоумышленника не хватит технических средств либо не стоит непосредственной задачи осуществления угрозы нарушения достоверности (при этом значение p_4 снизится, например, до 0,35), то получим следующие результаты:

$$u = 150\,000 \cdot 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95 + 100\,000 \cdot 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95 + 200\,000 \cdot 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,35 = \\ = 237\,851,26 \text{ усл. ед.};$$

$$d = (100\,000 + 25\,000 + 50\,000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95) + (100\,000 + 25\,000 + \\ + 50\,000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95) + (100\,000 + 25\,000 + 80\,000) \cdot (1 - \\ - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,35) = 242\,312,64 \text{ усл. ед.}$$

Как видно из результатов расчета, вероятная стоимость величины ущерба практически совпадает с вероятной стоимостью защитных средств, то есть при данных оценках экспертов полный комплекс защитных мер не оправдан.

Однако если попытаться найти других поставщиков решений для защиты информации в сетях PON и **удешевить** организацию защитных мер (примем $d_1 = 50\,000$ усл. ед.; $d_2 = 25\,000$ усл. ед.; $d_3 = 35\,000$ усл. ед.; $d_4 = 40\,000$ усл. ед.; при этом p_4 по-прежнему составит 0,35), то при неизменном значении вероятной стоимости величины ущерба ($u = 237\,851,26$ усл. ед.) вероятная стоимость защитных средств d снизится до значения:

$$d = (50\,000 + 25\,000 + 35\,000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95) + (50\,000 + 25\,000 + \\ + 35\,000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,95) + (50\,000 + 25\,000 + 40\,000) \cdot (1 - 0,85 \cdot 0,91 \cdot 0,35) = \\ = 142\,205,13 \text{ усл. ед.}$$

Тогда $u = 1,67d$ и, следовательно, можно снова говорить о целесообразности применения выбранного комплекса защитных мер на практике, если владелец (арендатор) сети PON не готов понести возможные риски, возникающие при реализации любой из трех возможных угроз защиты информации.

Как следует из приведенных примеров, методика расчета экономической эффективности защиты информации в пассивных волоконно-оптических сетях PON достаточно проста, однако конечный результат не всегда предсказуем, поскольку зависит как от объективных факторов (стоимости защитных мер, определяемой не только соотношением цена/качество, но и конкретными поставщиками), так и от субъективных факторов (оценок экспертов, дающихся, как правило, на основе анализа типовых сетей аналогичного профиля) [24].

Библиотека БГУИР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изложенной в настоящем учебно-методическом пособии информации можно выделить общие рекомендации, которые сводятся к следующим положениям:

1. Для уменьшения вероятности ошибки (увеличения значения ОСШ) необходимо варьировать «локальные» параметры сети. Каждый из предложенных вариантов требует самостоятельного расчета по методике, приведенной в разделах 2.1 и 2.2, с учетом факторов стоимости и надежности сети доступа [25, 26, 31, 32, 38, 41].

2. При расчете гибридных волоконно-коаксиальных сетей необходимо рассчитывать именно результирующее значение ОСШ от двух участков (волоконного и коаксиального). Результирующее ОСШ несколько снижается по сравнению с ОСШ непосредственно коаксиального участка, поэтому если волоконно-оптический участок не учтен, то это приводит к ошибочным выводам: может быть выбрана слишком высокая размерность QAM-модуляции, подходящая для коаксиального участка, но не подходящая для гибридной сети в целом [25, 26, 31, 32].

3. На коаксиальном участке требуется наличие большого количества активного оборудования (усилителей) [25, 32].

4. По сравнению со стандартом DVB-C стандарт «второго поколения» DVB-C2 позволяет существенно повысить эффективность использования спектра и защищенность системы от влияния собственных шумов (это достигается за счет применения более высоких размерностей QAM-модуляции (до QAM-4096) в сочетании с мощной системой помехоустойчивого кодирования на базе LDPC-кодов) [33].

5. Способ непосредственного распределения спутниковых каналов через сеть кабельного телевидения в стандартном диапазоне 47–862 МГц обладает большей защищенностью от собственных шумов по сравнению со стандартом DVB-C, но позволяет передавать меньшее количество каналов.

Свободные частотные диапазоны 47–230 МГц и 750–862 МГц можно использовать для трансляции телевизионных каналов по стандарту DVB-C, однако наличие такой возможности необходимо предварительно просчитать по методике, приведенной в разделах 2.1 и 2.2 [33].

6. Выбор структуры общегородских сетей кабельного телевидения необходимо осуществлять с учетом структуры городской телефонной сети и сети передачи данных (как правило, выполненной в виде самовосстанавливающихся волоконно-оптических колец), что позволит уменьшить протяженность волоконно-оптического тракта от головной станции до абонента и впоследствии отказаться от применения усилительного оборудования, а также обеспечить резервирование системы во время аварийных ситуаций [33].

7. Основной тенденцией оптимизации пассивных волоконно-оптических сетей PON в настоящее время является использование технологии WDM-PON наряду с обеспечением возможности взаимодействия ONT друг с другом без участия OLT (так называемая звездообразная структура WDM-PON) [35].

8. Рассмотренная методика описания возможных состояний каждого конкретного абонентского ONT в звездообразной сети PON и приведения полученной модели к известной одноканальной системе массового обслуживания с отказами позволяет оценить качество работы сети в целом и отдельного абонента в частности, применяя общедоступные средства вычисления [35].

9. Защита информации в пассивных волоконно-оптических сетях PON является комплексной задачей и имеет ряд характерных особенностей, которые обязательно необходимо учитывать при выборе и реализации системы защитных мер на практике. Несмотря на кажущуюся простоту методики расчета экономической эффективности защиты информации в сетях PON, сложнее всего получить объективные (достоверные) исходные данные, основываясь на заключениях экспертов и опыте аналогичных предприятий связи [27–30, 37].

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АР – абонентская розетка

АТС – автоматическая телефонная станция

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

ВОУ – волоконно-оптический усилитель

ГО – головное оборудование

ГС – головная станция

ЛФД – лавинный фотодиод

МВУ – максимально допустимый выходной уровень

ОП – оптический передатчик

ОПр – оптический приемник

ОСШ – отношение сигнал/шум

СКТВ – сеть кабельного телевидения

ПГС – подголовная станция

ЦГС – центральная головная станция

ЦТВ – цифровое телевидение

ASE – усиленная спонтанная эмиссия

CDMA – множественный доступ с кодовым разделением каналов

CWDM – разреженное спектральное разделение каналов

DEMUX – демультиплексор

DVB-C – стандарт цифрового вещания по кабельным сетям

DVB-S – стандарт цифрового спутникового вещания

DVB-T – стандарт цифрового эфирного вещания

DWDM – плотное спектральное разделение каналов

EDFA – эрбиевый волоконно-оптический усилитель

FBG – волоконная брэгговская решетка

FEC – упреждающая коррекция ошибок

FFH – скачкообразная перестройка частоты
FTTH – технология абонентского доступа «волокну в квартиру»
G-PON – стандарт «Гигабит-PON»
HFC – гибридная волоконно-коаксиальная сеть
NRZ – бинарный код «без возвращения к нулю»
LDPC – код с малой плотностью проверок на четность
MUX – мультиплексор
OLT – оптический линейный терминал
ONT – оптический сетевой (абонентский) терминал
OTDR – оптический рефлектометр
PIIN – фазоиндуцированный шум интенсивности света
PON – пассивная оптическая сеть
QAM – квадратурно-амплитудная модуляция
QPSK – четырехуровневая фазовая модуляция
RD – случайный диагональный код
SAT – спутниковое вещание
TDM – временное разделение каналов
WDM – спектральное разделение каналов

ЛИТЕРАТУРА

1. Ажмухамедов, И. М. Решение задач обеспечения информационной безопасности на основе системного анализа и нечеткого когнитивного моделирования / И. М. Ажмухамедов. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2012. – 344 с.
2. Ануфриев, А. DVB-S2 выходит на орбиту / А. Ануфриев // Телеспутник. – 2007. – №3. – С. 90–94.
3. Бауместер, Д. Физика квантовой информации / Д. Бауместер, А. Экерт, А. Цайлингер. – М. : Постмаркет, 2002. – 376 с.
4. Бирин, Д. А. Квантовое распределение ключей в пассивной оптической сети / Д. А. Бирин // Т-Comm. – 2012. – №7. – С. 27–29.
5. Бителева, А. Цифровое кабельное ТВ. В 4 ч. Ч. 4: Сигнал DVB в распределительной сети. Использование альтернативных стандартов / А. Бителева // Телеспутник. – 2008. – №1. – С. 86–89.
6. Булавкин, И. А. Вопросы информационной безопасности сетей PON / И. А. Булавкин // Технологии и средства связи. – 2006. – №2. – С. 104–108.
7. Бунас, В. Ю. Построение и расчет гибридных СКТ с глубоким проникновением оптики : метод. пособие / В. Ю. Бунас, Н. В. Тарченко, В. Н. Урядов. – Минск : БГУИР, 2012. – 55 с.
8. Бунас, В. Ю. Проектирование линейного тракта цифровых ВОСП : метод. пособие / В. Ю. Бунас, Н. В. Тарченко, В. Н. Урядов. – Минск : БГУИР, 2012. – 70 с.
9. Виноградова, И. Л. Многофункциональный компонент для волоконно-оптических систем связи с квазисолитонным режимом передачи / И. Л. Виноградова, А. А. Кашбиев, А. Х. Султанов // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – Т. 10, №4. – С. 23–30.
10. Виноградова, И. Л. Моделирование показателей функциональности звездообразной пассивной оптической сети на абонентском сегменте /

И. Л. Виноградова, В. М. Конюхова, А. Х. Султанов // Инфокоммуникационные технологии, 2011. – Т. 9, №2. – С. 11–18.

11. Волков, А. В. Пассивная активность или активная пассивность? / А. В. Волков // Lightwave Russian Edition. – 2007. – №1. – С. 24–32.

12. Приемные распределительные системы телевидения (проектирование и расчет) / М. С. Воробьев [и др.]. – Челябинск : Издатель Татьяна Лурье, 2002. – 240 с.

13. Галкин, А. П. Защита технических каналов связи предприятий и учреждений от несанкционированного доступа к информации: учеб. пособие / А. П. Галкин, В. С. Эмдин. – СПб. : СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2003. – 100 с.

14. Гарьепи, Д. Тестирование сетей FTTx / Д. Гарьепи // Lightwave Russian edition. – 2004. – №4. – С. 35–41.

15. ГОСТ Р 52592-2006. Тракт передачи сигналов цифрового вещательного телевидения. Звенья тракта и измерительные сигналы. Общие требования. – М. : Изд-во стандартов, 2007. – 32 с.

16. Гришачев, В. В. Проблемы информационной безопасности в волоконно-оптических технологиях связи / В. В. Гришачев, Д. Б. Халяпин, Н. А. Шевченко // Фотон-Экспресс. – 2009. – №6. – С. 132–133.

17. Гришачев, В. В. Фотоника в системах безопасности и защиты информации / В. В. Гришачев // Волоконно-оптические линии связи. – 2011. – №6. – С. 58–63.

18. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

19. Егоршев, Д. Е. Задачи оптимизации оптоволоконных сетей связи на участке абонентского доступа / Д. Е. Егоршев // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. – 2010. – №7. – С. 182–183.

20. Запрягаев, С. А. Основы криптографии. Курс лекций / С. А. Запрягаев.– Воронеж : ВГУ, 2006. – 124 с.

21. Системы кабельного телевидения / З. А. Зима [и др.] ; под ред. М. Ф. Тюхтина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 600 с.

22. Инженерные сети района многоэтажной и индивидуальной жилой застройки АТС-45 г. Гомель (проект линейных сооружений зак. 37/13) / Гомельский филиал РУП «Белтелеком». – Гомель : ГФ РУП «Белтелеком», ОКП, 2013. – 35 с.

23. Инженерные сети района многоэтажной и индивидуальной жилой застройки мкр-на «Молодежный» г. Ельск (проект линейных сооружений зак. 40/14) / Гомельский филиал РУП «Белтелеком». – Гомель : ГФ РУП «Белтелеком», ОКП, 2014. – 23 с.

24. Защита информации на уровне линейных сооружений волоконно-оптических линий связи от несанкционированного доступа / В. Каток [и др.] // Правовое, нормативное и метрологическое обеспечение системами защиты информации в Украине : материалы науч.-техн. конф., Киев, 2000. – №3. – С. 205–213.

25. Кириллов, В. И. Автоматизация расчета экономической эффективности защиты информации в сетях PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Информационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф., Минск, 23 окт. 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2013 – С. 46–47.

26. Кириллов, В. И. Анализ защищенности от собственных шумов в гибридных волоконно-коаксиальных сетях кабельного цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Веснік сувязі. – 2013. – №1. – С. 22–27.

27. Кириллов, В. И. Анализ защищенности от собственных шумов в кабельных сетях цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Вестник БелГУТ. Наука и транспорт. – 2012. – №2. – С. 16–17.

28. Кириллов, В. И. Анализ живучести абонентских сетей доступа, построенных по технологии пассивных оптических сетей PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Веснік сувязі. – 2014. – №6. – С. 33–35.

29. Кириллов, В. И. Живучесть абонентских сетей доступа, построенных по технологии пассивных оптических сетей PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Информационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф., Минск, 29 окт. 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014 – С. 52–53.

30. Кириллов, В. И. Исследование живучести пассивных оптических сетей доступа PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Технические средства защиты информации : материалы XII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28–29 мая 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 27.

31. Кириллов, В. И. Исследование обобщенной модели сценария атаки на информацию, передаваемую по пассивным волоконно-оптическим сетям PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Веснік сувязі. – 2014. – №2. – С. 38–43.

32. Кириллов, В. И. Методика анализа защищенности от собственных шумов в волоконно-оптических и гибридных волоконно-коаксиальных сетях цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Проблемы безопасности на транспорте : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 29–30 нояб. 2012 г. / БелГУТ. – Гомель, 2012. – С. 190–191.

33. Кириллов, В. И. Методика анализа защищенности от собственных шумов в гибридных волоконно-коаксиальных сетях кабельного цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Современные средства связи : материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 окт. 2012 г. / ВГКС. – Минск, 2012. – С. 35–36.

34. Кириллов, В. И. Методы передачи сигналов цифрового спутникового телевидения по волоконно-оптическим сетям доступа / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Веснік сувязі. – 2013. – №4. – С. 22–25.

35. Кириллов, В. И. Многоканальные системы передачи : учебник / В. И. Кириллов. – 2-е изд. – М. : Новое знание, 2003. – 751 с.

36. Кириллов, В. И. Основные направления оптимизации пассивных волоконно-оптических сетей PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Доклады БГУИР. – 2013. – №6. – С. 62–66.

37. Кириллов, В. И. Оптимальные направления развития цифровых сетей кабельного телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Доклады БГУИР. – 2014. – №1. – С. 93–96.

38. Кириллов, В. И. Разработка стандартной модели сценария атаки на информацию, передаваемую в сетях PON / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Междунар. науч.-техн. конф., приуроч. к 50-летию МРТИ-БГУИР : материалы конф., Минск, 18–19 марта 2014 г. : в 2 ч. / БГУИР. – Минск, 2014. – Ч. 2. – С. 144–145.

39. Кириллов, В. И. Расчет шумов в волоконно-оптических сетях кабельного цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Современные средства связи: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 окт. 2012 г. / ВГКС. – Минск, 2012. – С. 34–35.

40. Кириллов, В. И. Системы кабельного телевидения на коаксиальных и волоконно-оптических линиях связи / В. И. Кириллов // Бытовая радиоэлектронная техника: энциклопедический справочник / под ред. А. П. Ткаченко. – М. : БелЭн, 1995. – С. 527–562.

41. Кириллов, В. И. Телевидение и передача изображений : учеб. пособие / В. И. Кириллов, А. П. Ткаченко. – Минск : Высш. шк., 1989. – 319 с.

42. Кириллов, В. И. Шумы в волоконно-оптических сетях кабельного цифрового телевидения / В. И. Кириллов, Е. А. Коврига // Веснік сувязі. – 2012. – №4. – С. 37–41.

43. Коврига, Е. А. Автоматизация расчета защищенности от собственных шумов в волоконно-оптических, коаксиальных и гибридных сетях кабельного цифрового телевидения / Е. А. Коврига // Информационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф., Минск, 23 окт. 2013 г. / БГУИР. – Минск, 2013 – С. 56–57.

44. Коврига, Е. А. Использование программы Gainmaster™ компании «Fibercore» для моделирования волоконно-оптических сетей / Е. А. Коврига // Ин-

формационные технологии и системы : материалы междунар. науч. конф., Минск, 29 окт. 2014 г. / БГУИР. – Минск, 2014. – С. 60–61.

45. Колосков, А. Некоторые вопросы проектирования крупных систем кабельного телевидения / А. Колосков, В. Левченко // Телеспутник. – 2000. – №3. – С. 53–59.

46. Конюхова, В. М. Методы построения сетей городского масштаба с применением оптических решений : автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.12.13 / В. М. Конюхова; УГАТУ – КГТУ. – Уфа, 2011. – 17 с.

47. Проблемы защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи, от несанкционированного доступа / А. В. Корольков // Информационное общество. – 1997. – №1. – С. 74–77.

48. Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник / Н. Ш. Кремер. – 2-е изд. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

49. Кулик, С. П. Комбинированный фазово-временной метод кодирования в квантовой криптографии / С. П. Кулик, С. Н. Молотков, А. П. Маккавеев // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 85, вып. 6. – С. 354–359.

50. Курков, А. С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители / А. С. Курков, О. Е. Наний // Lightwave Russian Edition. – 2003. – №1. – С. 14–19.

51. Куприянов, А. И. Основы защиты информации : учеб. пособие / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров, В. А. Шевцов. – М. : Академия, 2006. – 256 с.

52. Липкович, Э. Б. Проектирование и расчет систем цифрового спутникового вещания : учеб.-метод. пособие / Э. Б. Липкович, Д. В. Кисель. – Минск : БГУИР, 2006. – 135 с.

53. Локшин, Б. А. Цифровое вещание: от студии к телезрителю / Б. А. Локшин. – М. : Компания Сайрус Системс, 2001. – 446 с.

54. Никульский, И. Е. Метод оценки задержек распространения при моделировании пакетных сетей / И. Е. Никульский, В. О. Пяттаев // Техника связи. – 2008. – №6. – С. 8–10.

55. Никульский, И. Е. Модели и методы построения широкополосных сетей доступа: автореф. ... дис. докт. техн. наук: 05.12.13 / И. Е. Никульский; ф-л ФГУП ЦНИИС – ЛО ЦНИИС. – СПб., 2011. – 33 с.
56. Никульский, И. Е. Модель оптической сети доступа GPON / И. Е. Никульский // Вестник связи. – 2011. – №2. – С. 49–50.
57. Никульский, И. Е. Модель оптической сети доступа GPON / И. Е. Никульский // Вестник связи. – 2011. – №4. – С. 38–41.
58. Никульский, И. Е. Технологии PON: взгляд в будущее / И. Е. Никульский, А. А. Филиппов // Вестник связи. – 2010. – №2. – С. 4–8.
59. Нильсен, М. Квантовые вычисления и квантовая информация / М. Нильсен, И. Чанг. – М.: Мир, 2006. – 824 с.
60. Оборудование для волоконно-оптических сетей и сетей кабельного телевидения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cisco.com>, <http://n-nets.ru>, <http://www.optokon.com>, <http://www.dvb-c.ru>, <http://www.latel.ru>, <http://www.mitsar.ru>. – Дата доступа: 11.06.2012.
61. Песков, С. Н. Критерий выбора головной станции СКТ на современном этапе / С. Н. Песков, С. Ю. Колгатин, И. А. Колпаков // Телеспутник. – 2005. – №12. – С. 76–79.
62. Песков, С. Н. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи / С. Н. Песков, А. Е. Ищенко // Телеспутник. – 2010. – №11. – С. 70–75.
63. Петренко, И. И. Пассивные оптические сети PON. Ч. 3: Проектирование оптимальных сетей / И. И. Петренко, Р. Р. Убайдуллаев // Lightwave Russian Edition. – 2004. – №3. – С. 21–28.
64. Птицын, Г. А. Вероятностные модели распада динамических сетей / Г. А. Птицын // Электротехнические и информационные комплексы и системы, 2006. – Т. 2, №4. – С. 54–58.
65. Румянцев, К. Е. Квантовая связь и криптография : учеб. пособие / К. Е. Румянцев, Д. М. Голубчиков. – Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2009. – 122 с.

66. Саморуков, А. П. Анализ живучести мультисервисных сетей связи, построенных по технологии PON / А. П. Саморуков // Т-COMM: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – №8. – С. 107–111.

67. Свинцов, А. Г. Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС / А. Г. Свинцов // Фотон-Экспресс-Наука. – 2006. – №6. – С. 39–56.

68. Семенов, А. Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС / А. Б. Семенов. – М. : Академия АйТи: ДМК Пресс, 2007. – 632 с.

69. Семенов, А. Б. Структурированные кабельные системы / А. Б. Семенов, С. К. Стрижаков, И. Р. Сунчелей. – М. : Компьютер Пресс, 1999. – 456 с.

70. Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учеб. пособие / О. К. Скляров. – СПб. : Лань, 2010. – 272 с.

71. Стивенсон, Д. Спутниковое телевидение в вашем доме / Д. Стивенсон. – М. : ДМК-Пресс, 2009. – 432 с.

72. Тарченко, Н. В. Проектирование цифровых систем и транспортных телекоммуникаций : учеб.-метод. пособие / Н. В. Тарченко. – Минск : БГУИР, 2011. – 58 с.

73. Татаркина, О. А. Волоконно-оптические системы передачи / О. А. Татаркина. – Екатеринбург : СибГУТИ, 2008. – 160 с.

74. Теория вероятностей : учебник для вузов / А. В. Печинкин [и др.]; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 456 с.

75. Типовое техническое решение по предоставлению телекоммуникационных услуг с применением оптического доступа FTTH на базе технологии пассивных оптических сетей. – Екатеринбург : ОАО «Уралсвязьинформ». – 2010. – 32 с.

76. Убайдуллаев, Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдуллаев. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 267 с.

77. Убайдуллаев, Р. Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA / Р. Р. Убайдуллаев // Lightwave Russian Edition. – 2003. – №1. – С. 22–28.

78. Хорошко, В. А. Методы и средства защиты информации / В. А. Хорошко, А. А. Чекатков. – Киев : Юниор, 2003. – 504 с.
79. Цуканова, О. А. Экономика защиты информации : учеб. пособие / О. А. Цуканова, С. Б. Смирнов. – СПб. : СПб ГУИТМО, 2007. – 59 с.
80. Чмора, А. Л. Современная прикладная криптография / А. Л. Чмора. – 2-е изд., стер. – М. : Гелиос АРВ, 2002. – 256 с.
81. Шаньгин, В. Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях / В. Ф. Шаньгин. – М. : ДМК-Пресс, 2012. – 592 с.
82. Экслер, Б. С. Кабельное телевидение с нуля: глазами очевидца и участника / Б. С. Экслер // Кабельщик. – 2004. – №4. – С. 7–21.
83. Gafar, M. Improvement of the Performance of Optical CDMA by Using Error Correction Code: a Thesis / M. Gafar.– Iraq : University of Technology, 2008. – 100 p.
84. Elsahn, Z. Smooth Upgrade of Existing FTTH Access Networks: SAC-OCDMA and Dense SS-WDM solutions / Z. Elsahn. – Quebec : University Laval, 2010. – 121 p.
85. Fadhil, H. Performance of OCDMA Systems Using Random Diagonal Code for Different Decoders Architecture Schemes / H. Fadhil [et al.] // The International Arab Journal of Information Technology. – 2010. – №1. – Pp. 1–5.
86. Jaeger, M. Способы трансляции SAT-каналов в СКТ / М. Jaeger, Т. В. Миргородская // Телеспутник. – 2011. – №9. – С. 84–90.
87. OFDM to power high bit rates in next-gen optical access networks / Naveena Genay [et al.] // Lightwave. – September 2009. – P. 32–36.
88. Oliver, C. E. Take control of your link-loss budget / C. E. Oliver, L. Huff // Lightwave. – January 2007. – P. 29, 31–32.
89. Robert, J. DVB-C2 – стандарт передачи по сетям КТВ следующего поколения / J. Robert, C. Schaaf, L. Stadelmeier // Телеспутник. – 2009. – №12. – С. 80–88.

Учебное издание

Кириллов Владимир Иванович
Коврига Екатерина Анатольевна

СИСТЕМЫ И СЕТИ
ЦИФРОВОГО КАБЕЛЬНОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. И. Герман*

Компьютерная правка, оригинал-макет *Степуть Е. Д.*

Подписано в печать Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж 30 экз. Заказ 64.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6