

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

А. Р. Салтыков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО
И ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ И ПРОВОДНЫХ
СИСТЕМ СВЯЗИ

ЧАСТЬ 3. ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ ДОСТУПА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

СПб ГУТ)))

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 621.391 (075.8)

ББК 32.86 – 01я73

С 16

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электрической связи Петербургского государственного
университета путей сообщения (ПГУПС) Императора Александра I

А. К. Канаев,

кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных

И. В. Гришин

*Утверждено редакционно-издательским советом СПбГУТ
в качестве учебного пособия*

С 16 Салтыков, А. Р.

Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических и проводных систем связи. Часть 3. Оптические сети доступа : учебное пособие / А. Р. Салтыков; СПбГУТ. – СПб., 2020. – 128 с.

Написано в соответствии с рабочей программой дисциплины «Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических и проводных систем связи» (модуль 3). Рассматриваются принципы функционирования и организации оптических сетей доступа, в частности пассивных оптических сетей PON (Passive Optical Networks). Особое внимание уделяется следующим аспектам: стандартизации сетей PON, исследованию и разработке активного и пассивного оборудования сетей PON, анализу предоставления услуг, методам проведения измерений, проектированию сетей PON.

Предназначено для подготовки бакалавров по направлениям: 11.03.02 «Инфокоммуникационные системы и сети связи», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика».

УДК 621.391 (075.8)

ББК 32.86 – 01я73

© Салтыков А. Р., 2020

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. История сетей абонентского доступа. Основные определения	6
1.1. Телефонная сеть общего пользования (ТфОП).....	7
1.2. Технология ISDN.....	7
1.3. Технологии xDSL.....	8
1.4. Технологии коллективного доступа (ТКД)	9
1.5. Технологии кабельного телевидения.....	11
1.6. Технологии Ethernet.....	12
2. Технология PON. Механизм работы. Принцип TDMA. Архитектура. Основные топологии и их сравнение	18
2.1. Принцип действия технологии PON.....	18
2.2. Архитектура пассивных оптических сетей.....	21
2.3. Топологии построения пассивных оптических сетей.....	24
3. Стандартизация сетей PON. Сети стандартов APON, BPON (ITU-T G.983.x)	26
3.1. Характеристики физического уровня стандарта BPON.....	28
3.2. Форма кадра BPON.....	29
4. Пассивные оптические сети стандарта GPON ITU-T G.984.X	32
4.1. Основные принципы.....	32
4.2. Физический уровень GPON.....	38
4.3. Канальный уровень GPON Transmission Convergence.....	38
5. Пассивные оптические сети стандартов 1G-EPON, 10G-EPON (IEEE 802.3ah, IEEE 802.3av)	44
5.1. Сети стандарта IEEE 802.3ah (1G-EPON).....	44
5.2. Сети стандарта IEEE 802.3av (10G-EPON).....	51
6. Активное оборудование сетей PON. Принципы разработки активного оборудования для сетей PON	54
6.1. Цели внедрения и основные преимущества технологии PON с точки зрения оператора связи.....	54
6.2. Принцип действия, структура, основные характеристики оптического линейного терминала (OLT).....	55
6.3. Особенности разработки блока коммутатора пассивных оптических сетей (OLT).....	57
6.4. Принцип действия, структура, основные характеристики оптического сетевого терминала (ONT).....	61
7. Пассивные оптические компоненты для сетей PON	63
7.1. Пассивный оптический сплиттер. PLC и FBT. Технологии изготовления	64
7.2. Основные производители разветвителей.....	74
7.3. Различные типы оптических разветвителей (в том числе по фактору, по типу разъема).....	75

8. Организация услуг Triple Play (VoIP, IPTV, INTERNET) в сетях PON. DBA в сетях PON. Организация CATV в сетях PON.....	78
8.1. Предоставление услуг в оптических сетях доступа. Сервисная модель предоставления услуг.....	78
8.1.1. Включение в сеть станционного оборудования OLT.....	80
8.1.2. Подключение абонента к сети PON.....	81
8.1.3. Общие принципы обеспечения качества обслуживания.....	83
8.2. Динамическое назначение полосы пропускания (DBA) в PON.....	84
8.2.1. DBA в сетях GPON.....	86
8.2.2. DBA в сетях EPON.....	86
8.2.3. Алгоритм DBA IPACT в сетях PON.....	88
8.3. Предоставление услуг CATV в сетях PON.....	91
9. Измерения в сетях PON.....	94
9.1. Источники потерь в сетях PON.....	94
9.2. Измерительное оборудование для сетей PON. Основные характеристики..	97
9.3. Основные этапы проведения измерений и тестирования в PON.....	100
10. Проектирование сетей PON.....	108
10.1. Малоэтажный (частный) жилой сектор в РФ.....	108
10.2. Расчет энергетического бюджета мощности и затухания при проектировании сетей PON.....	112
11. Сети PON нового поколения NG-PON2 (ITU-T G.989).....	116
11.1. Архитектура. Возможности и преимущества NG-PON2.....	116
11.2. Основные характеристики и области применения NG-PON2.....	118
Заключение.....	125
Список литературы.....	126

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Оптические сети доступа» предназначена для бакалавров, обучающихся по направлениям 11.03.02 «Инфокоммуникационные системы и сети связи» и 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика», которые в соответствии с ФГОС должны быть подготовлены к решению следующих профессиональных задач:

- разработка проектной и рабочей технической документации, оформление законченных проектно-конструкторских работ в соответствии с нормами и стандартами;
- готовность к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам;
- моделирование оптической сети доступа для передачи данных с предоставлением услуг фиксированной связи;
- настройка и адресация работы в оптических сетях доступа различной топологии, конфигурирование сетевого оборудования, предназначенного для оптических сетей доступа;
- мониторинг оборудования оптических сетей доступа для оценки его работоспособности.

Целью преподавания дисциплины «Оптические сети доступа» является изучение эволюции развития сетей абонентского доступа, а также изучение организационно-технических принципов построения, тенденций и особенностей развития ОСД (оптических сетей доступа), работающих на базе технологии пассивных оптических сетей PON (Passive Optical Networks), ознакомление с пассивными и активными оптическими компонентами, а также с методами и приборами для измерения параметров ОСД. Эта цель достигается путем решения следующих задач:

- изучение технологий широкополосного абонентского доступа, видов архитектуры и предоставляемых услуг;
- ознакомление с принципами и процессами разработки активного и пассивного оборудования ОСД;
- получение навыков конфигурирования услуг (Triple play) для предоставления конечным пользователям ОСД;
- ознакомление с особенностями проектирования и опытной эксплуатации ОСД;
- получение навыков проведения теоретических исследований, моделирования, работы с технической литературой по тематике ОСД;
- получение навыков работы со специальной измерительной аппаратурой в процессе проведения практических занятий, исследований.

1. ИСТОРИЯ СЕТЕЙ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Оптическая сеть доступа – сеть абонентского доступа, в которой стационарное и оконечное оборудование пользователя соединяются с помощью оптического кабеля.

Стационарное оборудование – оборудование, устанавливаемое на стороне оператора связи (офис, линейные сооружения вне офиса, точка присутствия (POP – Point of Presence)) и предназначенное для организации широкополосного доступа (услуг связи) для множества оконечных пользователей (абонентов). Примеры: OLT (для сетей PON), DSLAM (для сетей ADSL), коммутатор FTTX

Основные функции стационарного оборудования:

- коммутация трафика
- соединение с опорной (магистральной) сетью
- управление терминальным оборудованием

Оконечное (терминальное) оборудование – оборудование, устанавливаемое в непосредственной близости от конечного абонента – потребителя услуг связи (и телеметрии). Примеры: ТА, факс, модем, ONT и др.

Сфера доступа к высокоскоростным телекоммуникационным и компьютерным сетям в последние десятилетия является одной из наиболее динамично развивающихся областей телекоммуникаций. Современные технологии обеспечивают предоставление пользователю полного набора услуг Triple Play (передачу речи, данных и видеoinформации) по одной линии связи, соединяющей его с оператором мультисервисной сети связи. Для организации абонентского доступа задействуются различные среды передачи и различные технологии.

Существующие технологии доступа к компьютерным и телекоммуникационным сетям можно разделить на два основных класса: *проводные и беспроводные*.

Одним из важнейших критериев классификации технологий проводного доступа является используемая **среда передачи**. Это может быть витая медная пара, коаксиальный кабель, оптоволоконный кабель, а также проводка сетей электропитания или радиотрансляционных сетей. С учетом данного критерия технологии проводного абонентского доступа можно распределить на следующие группы:

- технологии доступа к услугам, предоставляемым абонентам телефонной сети общего пользования (ТфОП);
- технологии доступа к услугам цифровой сети с интеграцией служб;
- технологии цифровой абонентской линии – xDSL (витая медная пара – симметричный кабель);
- технологии сетей кабельного телевидения (коаксиальный и оптоволоконный кабели);

- технологии сетей коллективного доступа (проводка сетей электропитания, проводка радиотрансляционных сетей);
- технологии локальных вычислительных сетей LAN (витая пара, коаксиальный кабель и оптоволоконный кабель);
- технологии оптического доступа (оптоволоконный кабель)

1.1. Телефонная сеть связи общего пользования

- История развития телефонии началась в 1876 году, когда Александр Белл получил патент на одно из самых замечательных изобретений XIX века. От первых шагов по практической реализации сетей телефонной связи до наших дней прошло более ста сорока лет.
- 1895 год – первый подземный телефонный кабель в России при строительстве Нижегородской телефонной сети.
- 15 мая 1903 года – строительство телефонной канализации в Санкт-Петербурге.
- 1912 год – емкость первой телефонной станции в СПб достигла предела в 40 000 номеров.

Телефонная связь существенно изменилась: произошли такие глубокие изменения, как переход к цифровым методам передачи, коммутации и обработки информации или применение кабелей связи с оптическими волокнами (ОВ). ТфОП создавалась для предоставления услуг телефонии. Доступ абонентов к ограниченному набору услуг ТфОП осуществляется по линиям связи на основе медных пар с помощью оборудования (телефонных и факсимильных аппаратов и модемов), функционирующего в соответствии с алгоритмами установления телефонных соединений.

Доступная пользователю в ТфОП полоса частот ограничена полосой стандартного телефонного канала 300...3400 Гц. Максимальная скорость передачи информации при организации доступа через ТфОП к телекоммуникационным сетям составляет 56,7 кбит/с, что связано с ограничением скорости передачи данных по каналу тональной частоты. При этом абонент не может одновременно пользоваться услугами телефонии и доступа в Интернет. Возможности расширения набора предоставляемых услуг и увеличения скорости доступа к этим услугам в ТфОП исчерпаны.

1.2. Технология ISDN

Сеть ISDN (Integrated Services Digital Network) – цифровая сеть с интеграцией служб – цифровая сеть связи с коммутацией каналов.

Доступ в сетях ISDN также осуществляется по симметричному абонентскому кабелю, однако при этом набор предоставляемых услуг по сравнению с ТфОП существенно больше. Базовый ISDN-доступ (ISDN-

BRA канал с пропускной способностью 144 кбит/с, 2B+D) обеспечивает абоненту одновременный доступ к услугам телефонии и передачи данных. Возможен первичный доступ в формате ISDN-PRA с пропускной способностью 30B+D. Однако в силу невысокой эффективности использования сетей с коммутацией каналов для передачи пакетных данных, а также достаточно высокой стоимости технологии ISDN доступ не получил широкого распространения.

1.3. Технологии xDSL

Развитие xDSL-доступа (Digital Subscriber Line) отражает развитие методов передачи сигналов по витой медной паре. Эти технологии обеспечивают доступ к широкому спектру услуг по передаче мультимедийной информации. Вопросами стандартизации, а также продвижения технологий xDSL на рынке занимаются различные международные организации (ITU, ANSI, ETSI, DAVIC, ATM Forum, ADSL Forum). Данные технологии можно разделить на подгруппы: симметричного и асимметричного xDSL-доступа. Первые нашли применение главным образом в корпоративном секторе, вторые предназначены для предоставления услуг преимущественно индивидуальным пользователям – поэтому рассмотрим их подробнее.

Технологии асимметричного xDSL-доступа

В подгруппе методов асимметричного xDSL-доступа можно выделить следующие технологии:

ADSL (Asymmetrical DSL) – технология передачи цифровых потоков на расстояние до 2,7 км со скоростями (согласно Рек. G.992.1 ITU-T) не менее 6,144 Мбит/с в сторону пользователя и 640 кбит/с в обратном направлении. Использование метода кодирования DMT позволяет обеспечить одновременную высокоскоростную передачу данных и речевых сигналов по одной витой паре. Оборудование ADSL-доступа подключается к транспортным сетям по технологиям SDH и ATM. Помимо ITU-T стандарты для технологии ADSL были разработаны также ANSI (T1.413) и ETSI (TS 101 388).

RADSL (Rate Adaptive DSL) – нестандартизованный в ITU-T вариант ADSL, позволяющий изменять скорость передачи в линии по желанию оператора либо по такому критерию, как качество линии. В настоящее время адаптация скорости передачи к параметрам линии реализуется во всем выпускаемом ADSL-оборудовании.

G.Lite (Universal ADSL) – технология передачи цифровых потоков по обычной медной паре со скоростями (согласно рекомендации ITU-T G.992.2) не более 1,536 Мбит/с в сторону пользователя и 512 кбит/с в обратном направлении на расстояние до 3,5 км. Данная технология, в которой используется метод кодирования DMT, разработана для организации

доступа в Интернет по витой медной паре как альтернатива дорогостоящему ADSL-доступу.

ADSL2 – технология передачи цифровых потоков по медной паре со скоростями не менее 8 Мбит/с в сторону пользователя и 800 кбит/с в обратном направлении (рекомендация ITU-T G.992.3). Планировалось, что скорость передачи в оборудовании ADSL2 могла достигать 12 Мбит/с при передаче на расстояние до 1,5 км, а при использовании технологии инверсного мультиплексирования для ATM IMA скорость потока, направленного в сторону абонента по 4 витым парам, достигнет 40 Мбит/с;

G.Lite2 – второе поколение G.Lite. Требования к технологии определены в Рекомендации ITU-T G.992.4.

Однако наиболее популярными и востребованными из технологий xDSL на сегодняшний день являются ADSL2+ и VDSL2.

ADSL2+ – определена в Рекомендации ITU-T G.992.5, принятой в феврале 2003 г. Увеличенная полоса используемых частот (до 22 МГц) позволяет передавать данные со скоростью до 25 Мбит/с на расстояние около 1 км.

VDSL2 – требования к технологии определены в Рекомендации ITU-T G.993.2, принятой в феврале 2006 года. Данная технология поддерживает скорость передачи цифровых потоков по медной паре до 100 Мбит/с в сторону пользователя на расстояние до 0,5 км. Начиная с 1,6 км производительность VDSL2 равна ADSL2+.

Отметим, что на базе технологий ADSL2+ и VDSL2 в России с ноября 2010 года начала действовать и осуществляется по настоящее время программа модернизации сетей связи, проводимая Макрорегиональным филиалом «Центр» ПАО «Ростелеком» (МРФ «Центр»).

1.4. Технологии коллективного доступа

Сети коллективного доступа (СКД) предназначены для организации относительно недорогого доступа в Интернет для индивидуальных пользователей, проживающих в многоквартирных домах. Идея коллективного доступа состоит в использовании существующей в домах кабельной инфраструктуры (витая медная пара, радиотрансляционные сети, электрическая проводка). В подключаемом к Интернету доме устанавливается концентратор трафика. Для подключения концентратора к узлу служб транспортной сети могут использоваться разные технологии (PON, FWA, спутниковые и др.). Таким образом, СКД являются гибридными, объединяющими в себе как сети коллективного доступа, так и сети, обеспечивающие транспортировку трафика.

Серия стандартов HPNA

Стандарты HPNA появились в результате деятельности альянса Home Phoneline Networking Alliance, созданного в 1996 г. для разработки технологии, которая на основе существующей в домах кабельной сети должна была обеспечить относительно недорогой доступ в Интернет. Технология HPNA стандартизована в ITU-T G.989.1 и G.989.2.

HPNA 1.0 – создан в 1998 г. Для передачи сигналов используется полоса частот 4...10 МГц, поэтому системы HPNA не оказывают влияния на телефонные и другие системы, работающие по тому же кабелю. Системы доступа HPNA 1.0 обеспечивают коллективный доступ к каналу с пропускной способностью 1 Мбит/с на расстояние до 150 м. В качестве метода доступа к среде передачи применяется CSMA/CD (IEEE 802.3). Для передачи информации используется модуляция DMT. Типовая топология сети – "звезда". Ядро сети - коммутатор HPNA, порты которого подключаются к соответствующей абонентской линии. Максимальное количество абонентов в сети - 32. В стандарте HPNA 1.1 дальность действия оборудования увеличена до 300 м.

HPNA 2.0 – появился в 2000 г. В сетях данного стандарта пропускная способность коллективного канала увеличена до 10 Мбит/с при дальности действия системы до 350 м. Типовая топология сети – «шина». Работа такой сети не требует применения коммутаторов и других активных устройств.

HPNA 3.0 – данная спецификация была предложена компаниями Broadcom и CorpperGate и одобрена в ITU в феврале 2005. Пропускная способность домашней сети была увеличена до 128 Мбит/с. Допускается совместное использование домашней сети с телефонной линией, ADSL и ISDN. Спецификация полностью обратно совместима с предыдущей версией и предусматривает возможность одновременной передачи до восьми голосовых потоков по протоколу Voice-over-HPNA.

HPNA 3.1 – это первый из нового поколения стандартов домашних сетей, разработанный для новых «развлекательных» приложений, таких как IPTV, которые предполагают наличие высокой и стойкой производительности в целом доме. Технология этого типа обеспечивает дополнительные возможности, такие как гарантированное качество обслуживания (Quality of Service) и используется большинством провайдеров для обеспечения услуг Triple play (видео, звук и информация). HomePNA 3.1 был разработан как для увеличения функциональности в коаксиальных проводах и расширения их сетевых возможностей, так и для преодоления некоторых ограничений телефонных сетей.

Технология PLC

Разработкой стандартов технологии PLC (Power Line Communications), реализуемой на базе инфраструктуры сетей электропита-

ния, занимаются различные международные организации, такие как PLC Forum, Powerline World и Home Plug Powerline Alliance. Последняя из них приняла в 2001 г. единый стандарт HomePlug 1.0 specification, в котором определены скорости передачи данных до 14 Мбит/с, методы доступа к среде передачи CSMA/CD или CSMA/CA и модуляции OFDM. Стандартизация PLC-технологии ведется также и в ETSI (TS 101 867, TS 101 896, TR 102 049).

1.5. Технологии кабельного телевидения

Сети кабельного телевидения (КТВ) изначально предназначались для организации трансляции пользователям телевизионных программ по распределительным сетям на основе коаксиального кабеля и строились по однонаправленной схеме. В начале 90-х годов были предприняты многочисленные, но неудачные попытки создания и внедрения технологий построения интерактивных сетей доступа к мультимедийным услугам на базе гибридных сетей КТВ – Hybrid Fiber Coaxial (HFC). Массовое развертывание HFC-сетей началось после появления в 1997 г. стандарта DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification). Сегодня используется пять вариантов данного стандарта, определяющих построение интерактивных систем КТВ на базе гибридной HFC-технологии: три американских (DOCSIS 1.0; 1.1; 2.0), один европейский (Euro-DOCSIS) и один международный.

DOCSIS 1.0 – был создан для сетей КТВ США. Он определяет физический и MAC-уровни, уровень управления для кабельных модемов и головных станций, принципы обеспечения сетевой безопасности и качества обслуживания. Для организации обратного канала используется диапазон 5...42 МГц. Метод доступа к обратному каналу – TDMA, методы модуляции – QPSK и QAM-16, скорость передачи – до 1 Мбит/с. Для защиты информации используется стандарт цифрового шифрования DES с длиной ключа 40 бит. Модель обеспечения качества обслуживания основана на классах обслуживания QoS. Прямой канал с полосой частот 6 МГц может быть организован в диапазоне частот 88...860 МГц. Методы модуляции в прямом канале – QAM-64 и QAM-256, скорости передачи соответственно 30,34 и 42,88 Мбит/с. В 1998 г. версия DOCSIS 1.0 была принята ИТУ-Т в качестве международного стандарта J.112

DOCSIS 1.1 – вторая версия стандарта была создана в 1999 г. В ней была увеличена скорость передачи в обратном канале до 5 Мбит/с, улучшена эффективность использования пропускной способности обратного канала за счет введения механизмов фрагментации пакетов и подавления заголовков, повышена сетевая безопасность благодаря введению аутентификации кабельных модемов.

DOCSIS 2.0 – данный стандарт опубликован в 2002 г., пропускная способность обратного канала увеличена до 30,72 Мбит/с при ширине полосы частот до 6,4 МГц. В качестве метода доступа к обратному каналу используются варианты Advanced TDMA (A-TDMA) или Synchronous CDMA (S-CDMA). В обратном канале дополнительно используются методы модуляции QAM-8, QAM-32, QAM-64, а также QAM-128 с решетчатым кодированием (trelliscoded).

DOCSIS 3.0 – выпущен в августе 2006 г., ратифицирован как международный стандарт ITU-T J.222 (2007). DOCSIS 3.0 позволяет объединять каналы на кабельном модеме, тем самым увеличивая скорость доступа. Объединяются до 16 прямых и 8 обратных каналов. До появления стандарта DOCSIS 3.0 полоса на одного пользователя в downstream-канале составляла примерно 25 Мбит/с, в upstream-канале – не более 10 Мбит/с. Это обусловлено невозможностью выделения всех тайм-слотов на одно абонентское устройство. Также в DOCSIS 3.0 появилась поддержка multicast, шифрования AES и др.

DOCSIS 3.1 – впервые представлен в октябре 2013 года; обеспечивает скорость 10/1 Гбит/с. Согласно этой спецификации вместо частотного разделения каналов шириной 6 МГц и 8 МГц используются OFDM-поднесущие шириной от 20 кГц до 50 кГц, укладываемые в спектр шириной до 200 МГц. Также в DOCSIS 3.1 сокращаются сетевые задержки благодаря AQM, а модемы потребляют меньше электроэнергии. Первым провайдером, предоставляющим Интернет по DOCSIS 3.1, стал немецкий Unitymedia в 2018 году.

DOCSIS 4.0 – улучшает DOCSIS 3.1 для использования полного спектра кабеля (от 0 МГц до ~1,2 ГГц) одновременно в обоих направлениях. Стандарт обеспечивает многогигабитные симметричные сервисы, оставаясь обратно совместимым с DOCSIS 3.1. CableLabs выпустила полную спецификацию в октябре 2017 года. Представленный вначале как DOCSIS 3.1 Full Duplex, новый стандарт впоследствии был переименован в DOCSIS 4.0.

Euro-DOCSIS. – представляет собой вариант американского стандарта DOCSIS, адаптированного к европейским кабельным сетям. Для организации обратного канала выделен диапазон 5...65 МГц, для прямого канала – 108-862 МГц. Полоса частот в прямом канале – 8 МГц. Методы модуляции в прямом канале – QAM-64 и QAM-256, скорости передачи соответственно около 37 и 52 Мбит/с.

1.6. Технологии Ethernet

В названии семейства технологий Ethernet объединено два английских слова – ether (эфир) и net (сеть). Такое именование объясняется идеей, положенной в основу работы сети, построенной в научно-исследовательском

центре Херох (Xerox Palo Alto Research Center) в Пало-Альто в середине 1970-х годов. Первая сеть Ethernet работала на коаксиальном кабеле, использовала принцип случайного доступа к общей среде (эффиру) и позволяла передавать данные со скоростью 2,94 Мбит/с. С зарождением Ethernet связывают фамилии Роберта Меткалфа (Robert Metcalfe) и Дэвида Боггса (David Boggs), опубликовавших в 1976 году совместный труд "Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks" ("Ethernet: распределенная пакетная коммутация для локальных компьютерных сетей").

В 1979 году Роберт Меткалф создает собственную компанию 3Com и работает над продвижением новой технологии. Совместными усилиями DEC, Intel и Херох в 1980 разработана спецификация Ethernet также известная под названием DIX (по первым буквам участников проекта). Так Ethernet из лабораторно-экспериментального состояния переходит в технологию для построения новых сетей, работающих с немалой для того времени скоростью передачи данных 10 Мбит/с.

В начале 80-х годов Институт инженеров по электротехнике и электронике (Institute of Electrical and Electronics Engineers) выпускает группу стандартов IEEE 802.3. Стандарты Ethernet определяют проводные соединения и электрические сигналы на физическом уровне, формат пакетов и протоколы управления доступом к среде – на канальном уровне модели OSI. Постепенно Ethernet превращается из запатентованной разработки Херох в открытую и доступную всем технологию.

В ранних версиях стандарт описывал структуру, в которой компьютеры сети подключались к общему коаксиальному кабелю по топологии «шина», рис. 1.1.

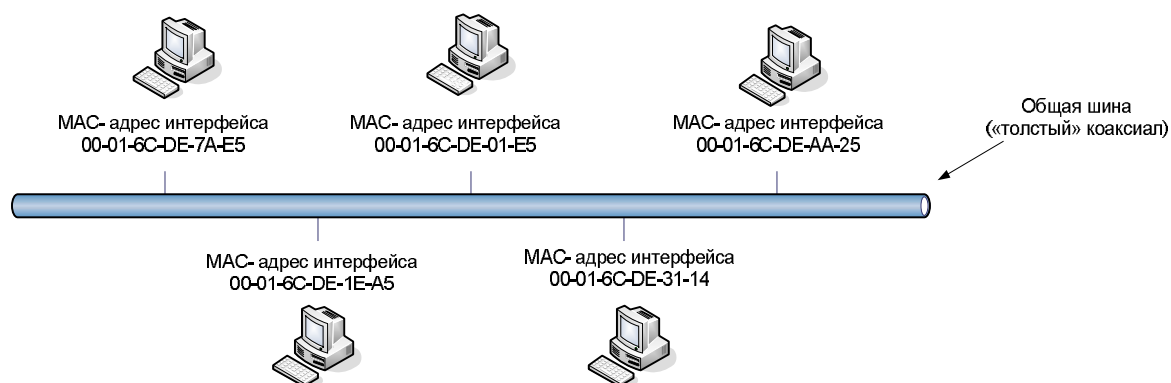


Рис. 1.1. Структура ранних сетей Ethernet – топология шина

В такой сети кабель являлся носителем общего электромагнитного эфира. Каждый ПК отправлял в шину электрические сигналы, все остальные ПК их получали. Этот принцип коллективного доступа применяется в радиосети и сетях работающих с общей средой, например по общей шине. В эфире данные передаются не однородным потоком, а блоками, называе-

мыми кадрами (frame). Базовая структура кадра Ethernet приведена на рис. 1.2.

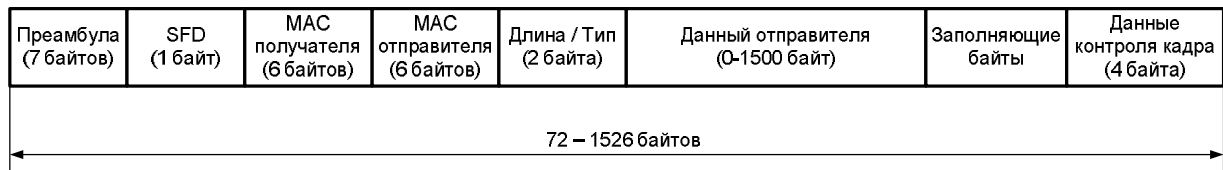


Рис. 1.2. Структура кадра Ethernet IEEE 802.3

Каждый кадр состоит из служебных данных и данных отправителя (полезные данные пользователей).

Кадр начинается с преамбулы длиной 7 байт. Каждый байт преамбулы – последовательность вида: 10101010. Преамбула обеспечивает синхронизацию приемника сетевого интерфейса и разграничение кадров. Далее следует разделитель начала кадра (SFD – Start-Frame Delimiter) занимающий 1 байт – кодовая последовательность 10101011.

Так как все компьютеры работают по общей шине, то требуется механизм позволяющий указать, кому именно предназначены данные, отправленные в общий эфир. Таким механизмом стали идентификаторы – MAC-адреса (Media Access Control address, адрес управления доступом к носителю данных). Все интерфейсы в пределах сети имеют уникальные MAC-адреса, которые формируются из шести байт. В кадре два поля по 6 байт служат для адресации. В них записываются адрес назначения Destination Address DA и адрес узла-отправителя Source Address SA. Первые 3 байта MAC адреса обозначают производителя устройства и называются уникальным идентификатором организации (Organizationally Unique Identifier, OUI). Любая организация, решившая производить сетевые интерфейсы, регистрируется в IEEE и получает свой идентификатор, уникальность которого гарантирует IEEE. Последние 3 байта MAC-адреса производитель назначает сам и за их уникальностью следит тоже сам. Таким образом, при соблюдении производителями стандартов, обеспечивается уникальность адресов сетевых интерфейсов.

Следующее за MAC адресами поле размером 2 байта указывает на размер кадра или тип вышестоящего протокол.

Поле данных пользователя может содержать от 0 до 1500 байт. Если длина поля меньше 46 байт, то используется следующее поле – поле заполнения. Если длина поля данных достаточна, то поле заполнения в кадре не появляется.

Байты поля заполнения дополняют кадр до минимально допустимой длины, которая обеспечивает корректную работу механизма обнаружения коллизий. Коллизии (collision – ошибка наложения, столкновения) – возникает при попытке двух и более станций передать кадр в один и тот же момент времени в среде передачи коллективного доступа. При этом происходит наложение кадров, и возникают ошибки. Если во время передачи

кадра рабочая станция обнаруживает другой сигнал, занимающий передающую среду, она останавливает передачу и ждет в течение случайного промежутка времени. Такой метод доступа к среде передачи данных, называют методом коллективного доступа с опознаванием несущей и обнаружением коллизий (carrier sense multiple access with collision detection, CSMA/CD).

Контрольная сумма занимает 4 байта и позволяет проверить целостность кадра. Если рассчитанные на приеме и переданные в кадре суммы совпали, то, скорее всего, данные в кадре при передаче не повредились. Несовпадение суммы позволяет выявить наличие ошибки, однако не позволяет восстановить данные на приеме, поэтому в случае несовпадения суммы весь кадр считается ошибочным и его необходимо передать заново.

Если рассматривать стандарты Ethernet в контексте базовой эталонной модели взаимодействия открытых систем (OSI), то рекомендации IEEE в основном относятся к ее двум нижним уровням: физическому и канальному, рис. 1.3. Физический уровень (*physical layer*) – нижний уровень модели, который определяет метод передачи данных, представленных в двоичном виде, от одного устройства (сетевого интерфейса) к другому. Канальный уровень (*data link layer*) предназначен для обеспечения взаимодействия сетей по физическому уровню и контроля за ошибками, которые могут возникнуть. Полученные с физического уровня данные, представленные в битах, он упаковывает в кадры, проверяет их на целостность и отправляет на сетевой уровень. Канальный уровень может взаимодействовать с одним или несколькими физическими уровнями, контролируя и управляя этим взаимодействием.

Протокольная организация Ethernet предусматривает контроль коллизий, т.е. одновременную передачу по общей линии сообщений более чем одной станцией. Для этого в различных версиях Ethernet предусмотрены такие механизмы, как CSMA/CD или MPCP и т.д. Метод доступа CSMA/CD (Carrier-Sense Multiply-Access/Collision Detection) называется методом коллективного доступа с опознанием несущей и обнаружением коллизий и применяется исключительно в сетях с логической общей шиной, к которой подключаются рабочие станции. Метод доступа MPCP (Multi-Point Control Protocol) – протокол управления множеством узлов, который представляет порядок передачи данных и устраняет коллизии.

Протокол управления логическим каналом LLC может поддерживать одну из процедур передачи:

- передача без установления соединений и без подтверждений (дейтаграммы);
- передача с установлением соединения (образования логического канала) и подтверждением;
- передача без установления соединения, но с подтверждением.

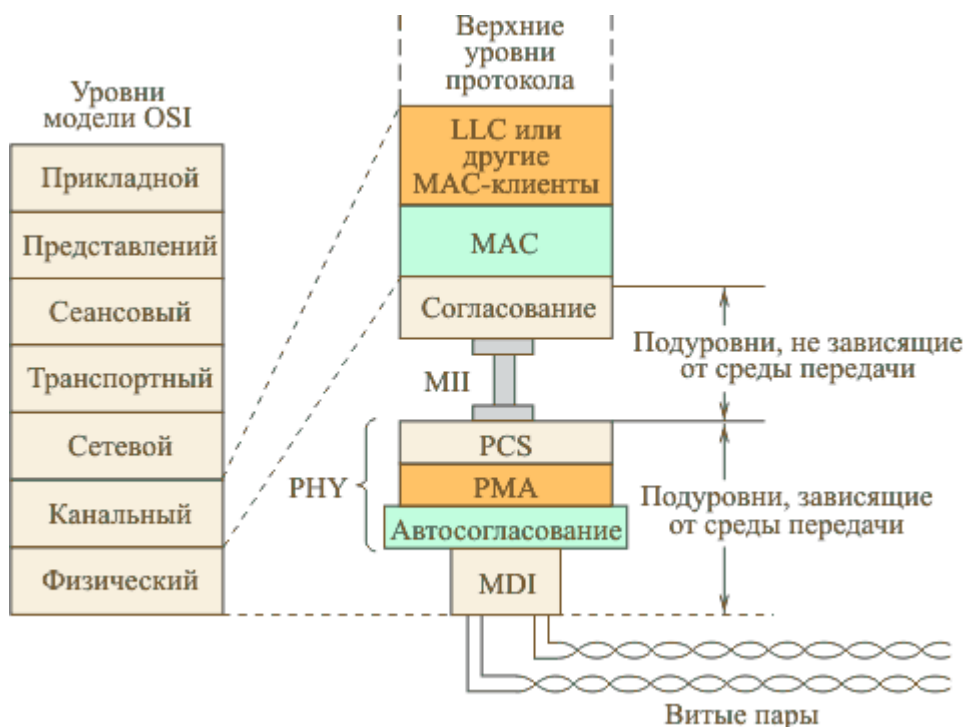


Рис. 1.3. Структура физического и канального уровня Ethernet

Протоколы управления доступом к среде MAC – это уже рассмотренные примеры CSMA/CD и MPCP. Физическое кодирование PCS зависит от вида среды передачи, например, используется кодирование 4B5B в формате NRZ для передачи по волоконно-оптической линии.

В начале 90-х годов начала ощущаться недостаточная пропускная способность 10-мегабитного Ethernet. Вследствие этого многие сегменты 10-мегабитного Ethernet стали перегруженными, а частота возникновения коллизий существенно возросла, еще более снижая номинальную пропускную способность. Для решения проблемы недостаточной пропускной способности Ethernet группа производителей сетевого оборудования в 1992 году образовала некоммерческое объединение Fast Ethernet Alliance для разработки высокоскоростного стандарта. Результатом работы в 1995 году стала новая технология Fast Ethernet описанная в спецификации IEEE 802.3u, дополняющей существующий стандарт 802.3.

Примерно через год после принятия стандарта 802.3u началась разработка технологии передачи данных со скоростью 1 Гбит/с. В Gigabit Ethernet Alliance вошли 11 ведущих компаний: 3Com Corp; Bay Networks, Inc.; Cisco Systems, Inc.; Compaq Computer Corp; Granite Systems, Inc.; Intel Corporation; LSI Logic; Packet Engines, Inc.; Sun Microsystems Computer Company; UB Networks и VLSI Technology, заинтересованных в разработке и внедрении этой технологии. В 1998 году, на момент принятия стандарта Gigabit Ethernet (IEEE 802.3z) альянс включал уже более 100 компаний. Спецификация 802.3z описывает использование одномодового и многомодового оптического волокна.

В 1999 году был сформирован новый Альянс 10GЕА (10 Gigabit Ethernet Alliance), а в 2002 была окончательно утверждена спецификация IEEE 802.3ae (10 Gigabit Ethernet).

Технология 10 Gigabit Ethernet во многом реализует первоначального варианта Роберта Меткалфа тридцатилетней давности. Вызывает удивление насколько большой запас в ней заложен.

В период с 2007 года разработаны группы стандартов Ethernet, описывающих передачу данных со скоростью 40 и 100 гигабит в секунду (IEEE Std 802.3ba-2010). Технология Ethernet уже давно вышла за пределы локальных сетей и в настоящее время используется также в глобальных (WAN – wide area networks) и городских сетях (MAN – metropolitan area networks) и похоже, на этом развитие не закончится.

2. ТЕХНОЛОГИЯ PON. МЕХАНИЗМ РАБОТЫ. ПРИНЦИП TDMA. АРХИТЕКТУРА. ОСНОВНЫЕ ТОПОЛОГИИ И ИХ СРАВНЕНИЕ

2.1. Принцип действия технологии PON

Волоконно-оптические сети связи (ВОСС) строятся при непосредственном использовании коммутационного и маршрутизирующего оборудования, которое позволяет осуществлять конфигурацию сети.

Оптические сети можно разделить на два класса – активные и пассивные. Между узлом доступа и оконечным пользовательским оборудованием активной сети имеется какое-либо активное оборудование (например, регенератор или коммутатор). В пассивной сети активное оборудование отсутствует, то есть сеть состоит только из пассивных компонентов. К пассивным компонентам относят:

- оптические волокна и кабели;
- оптические соединители;
- соединительные и разветвительные муфты;
- телекоммуникационные шкафы, ящики и коробки;
- кроссовое оборудование;
- патч-панели и патч-корды;
- оптические разветвители (сплиттеры);
- мультиплексоры WDM для спектрального уплотнения.

Существует несколько различных типов ОСД (оптических сетей доступа), на которые ссылаются стандарты ITU (Международный Союз Электросвязи) (1,2) и IEEE (Институт инженеров по электротехнике и электронике) (3,4). В зависимости от архитектуры ОСД между провайдером услуг ISP (Internet Service Provider) и конечным пользователем конфигурации ОСД могут называться:

- «Fiber To The Home» (FTTH) – «оптика в квартиру»;
- «Fiber To The Building» (FTTB) – «оптика в здание (строение)»;
- «Fiber To The Curb» (FTTC) – «оптика до группы зданий»;
- «Fiber To The Cabinet» (FTTCab) – «оптика до распределительного шкафа».

Потребность развития инфраструктуры широкополосного доступа на основе экономичных оптических технологий, использующих принцип FTTx, указывает на необходимость внедрения технологии PON (Passive Optical Network – Пассивных Оптических Сетей), применение которой позволяет решить эти проблемы.

Данная технология предусматривает построение сети доступа с большой пропускной способностью при минимальных капитальных затратах. Такое решение предполагает создание разветвленной сети (преимущест-

венно древовидной топологии) без активных компонентов – на пассивных оптических разветвителях – сплиттерах (splitter).

Информация для всех пользователей передается одновременно с временным разделением каналов (TDMA – Time Division Multiple Access) от оптического линейного терминала (OLT) до конечных оптических сетевых блоков (ONU/ONT)¹, расположенных у самого абонента. Передача и прием в обоих направлениях производится, как правило, по одному ОВ, но на разных длинах волн (1490 нм – от OLT к ONU/ONT и 1310 нм – от ONU/ONT к OLT).

Оптическая мощность с выхода OLT в узлах сети делится (равномерно или неравномерно) таким образом, чтобы уровень сигнала на входе всех ONU/ONT был примерно одинаков. В случае, когда одна из длин волн (чаще всего 1550 нм) выделяется всем абонентам для передачи телевизионного сигнала, на АТС устанавливается оптический мультиплексор WDM для объединения передаваемых сигналов на длинах волн 1490 нм (голос, данные) и 1550 нм (видео). В обратном направлении сигнал (голос, данные) передается на длине волны 1310 нм. Упрощенная структура сети PON представлена на рис. 2.1.

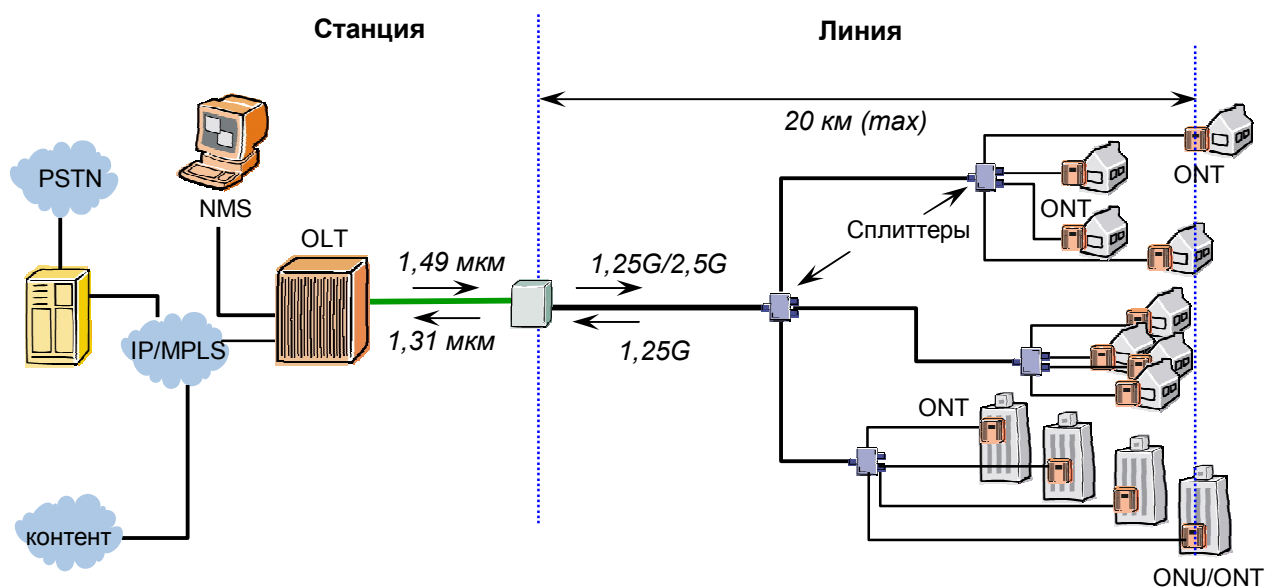


Рис. 2.1. Структура сети PON

Таким образом, основная идея технологии PON – использование всего одного приемопередающего модуля в OLT для передачи информации

¹ В качестве абонентских устройств могут использоваться ONU (оптическое сетевое устройство) или ONT (абонентский терминал). В существующей литературе эти понятия часто смешивают. В соответствии с рекомендациями МСЭ под ONT понимают индивидуальное абонентское устройство, оставляя за многопользовательскими абонентскими устройствами аббревиатуру ONU.

множеству абонентских устройств ONU/ONT и приема информации от них. Реализация этого принципа показана на рис. 2.2.

Число абонентских узлов, подключенных к одному приемо-передающему модулю OLT («дереву» PON), может быть настолько большим, насколько позволяет бюджет мощности и максимальная скорость приемо-передающей аппаратуры. Для передачи потока информации от OLT к ONU/ONT – прямого (нисходящего) потока используется длина волны 1490 нм. Потоки данных от абонентских узлов в центральный узел, совместно образуя обратный (восходящий) поток, передаются на длине волны 1310 нм. Прямой поток на уровне оптических сигналов является широкоэмитерным (Broadcasting). Каждый ONU/ONT, читая адресные поля, выделяет из этого общего потока предназначенную только ему часть информации.

С точки зрения масштабируемости по полосе пропускания данный подход уже подразумевает достаточно высокую полосу пропускания для абонентского терминала ONU/ONT (до 40 Мб/с индивидуальной полосы при установке до 64 ONU/ONT на «дерево» PON), но при увеличении запроса на полосу со стороны ресурсоемких услуг возможно распределение меньшего количества ONU/ONT на один приемопередающий порт OLT, позволяющее выделить большую полосу для каждого терминала. С точки зрения масштабируемости по услугам достаточно заменить домашний шлюз доступа, если уже установленный не удовлетворяет вновь возникающим запросам. Инфраструктурная часть – ONU/ONT и оптическое волокно – остается неизменной.

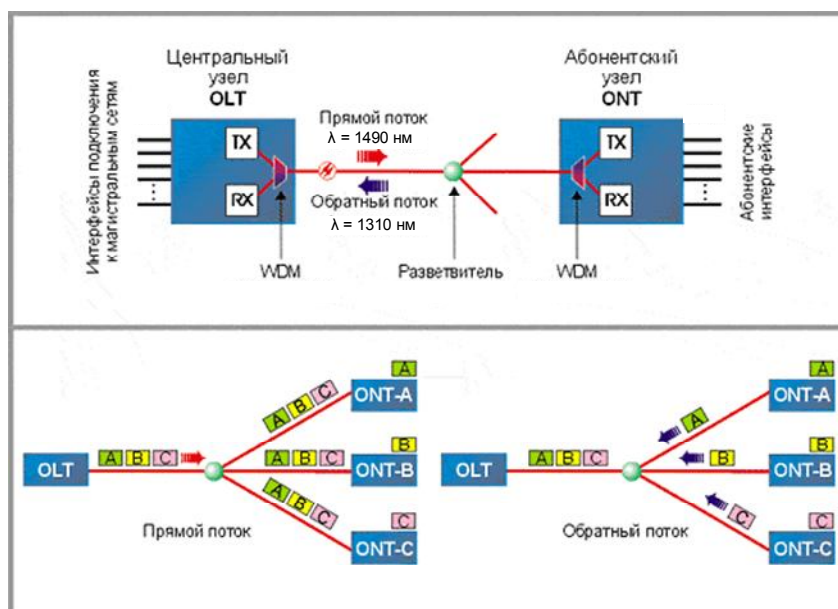


Рис. 2.2. Принцип действия общий вид организации PON

2.2. Архитектура пассивных оптических сетей

Сеть по технологии PON состоит из трех основных участков (рис. 2.3) – станционного, линейного и абонентского.

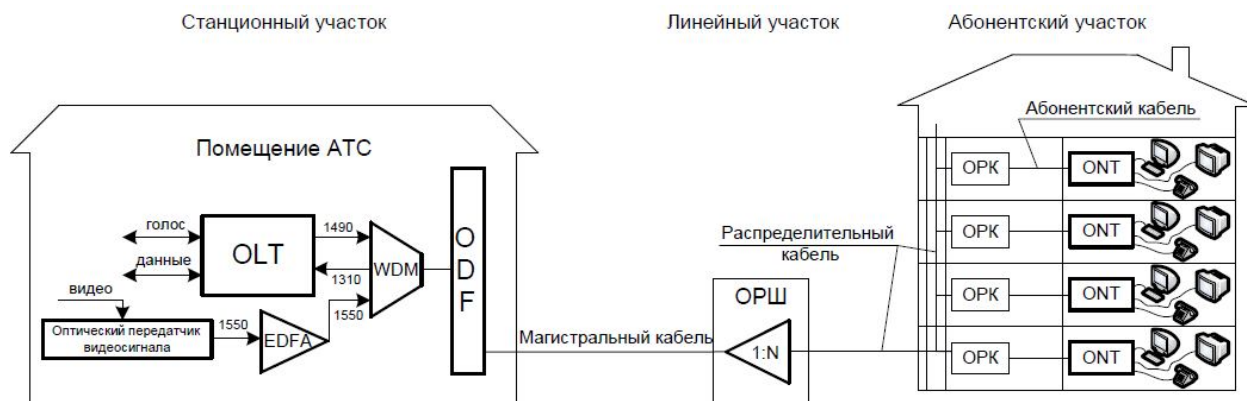


Рис. 2.3. Схема сети PON

Станционный участок – это активное оборудование OLT, WDM мультиплексор и оптический кросс (ODF) высокой плотности, смонтированные на узле электросвязи в помещении АТС. OLT располагается в помещении АТС, район обслуживания которой определяет зону охвата сетью PON. Активное станционное оборудование PON, в качестве которого выступает OLT, связывает оконечное оборудование абонентов с сетью Интернет и другими источниками услуг по передаче голоса, данных и видео (услуга Triple Play).

Линейные порты PON оборудования OLT подключаются к оптическому кроссу высокой плотности ODF с помощью оптических шнуров (патчкордов) или оконцованных микрокабелей (предтерминированных производителями заказных наборов ВОК).

Оптический кросс ODF предназначен для распределения ВОК по направлениям, перекроссировки (коммутации) и соединения со станционным ВОК через сплайс-пластины (кассеты и боксы для сварных соединений). ODF должен располагаться в том же помещении АТС (автозал, цех, кросс), где и размещается стойка с OLT. В случае использования на PON двухкаскадной схемы размещения сплиттеров², первый каскад с малым коэффициентом разветвления (1:2, 1:4) следует устанавливать непосредственно в ODF.

Линейный участок – это совокупность ВОК, шкафы, коробки, сплиттеры, коннекторы и соединители, располагающиеся между станционным и абонентским участком (участок между ODF и ОРК (оптическая распределительная коробка), как показано на рис. 2.3).

² Двухуровневая схема размещения сплиттеров является наиболее используемой операторами связи.

Линейный участок, при строительстве которого требуется произвести разнообразные трудоемкие строительные-монтажные работы для установки большого количества пассивного оборудования, требует наиболее внимательного подхода для оптимального его построения. Рекомендуется использовать технологии и методы, которые позволяют минимизировать трудозатраты и время строительства, а также уменьшить стоимость использованного оборудования для монтажа. Линейный участок определяет итоговую топологию PON.

В сети PON от ОРШ (оптический распределительный шкаф) до ONU/ONT связь осуществляется через пассивные оптические сплиттеры, которые устанавливаются в ОРК и/или в ОРШ (реже в механических оптических муфтах). На сети может быть использована как одноуровневая (однокаскадная) схема включения сплиттеров без последовательного их включения друг за другом, так и многокаскадная схема с последовательным размещением (рис. 2.4) сплиттеров.

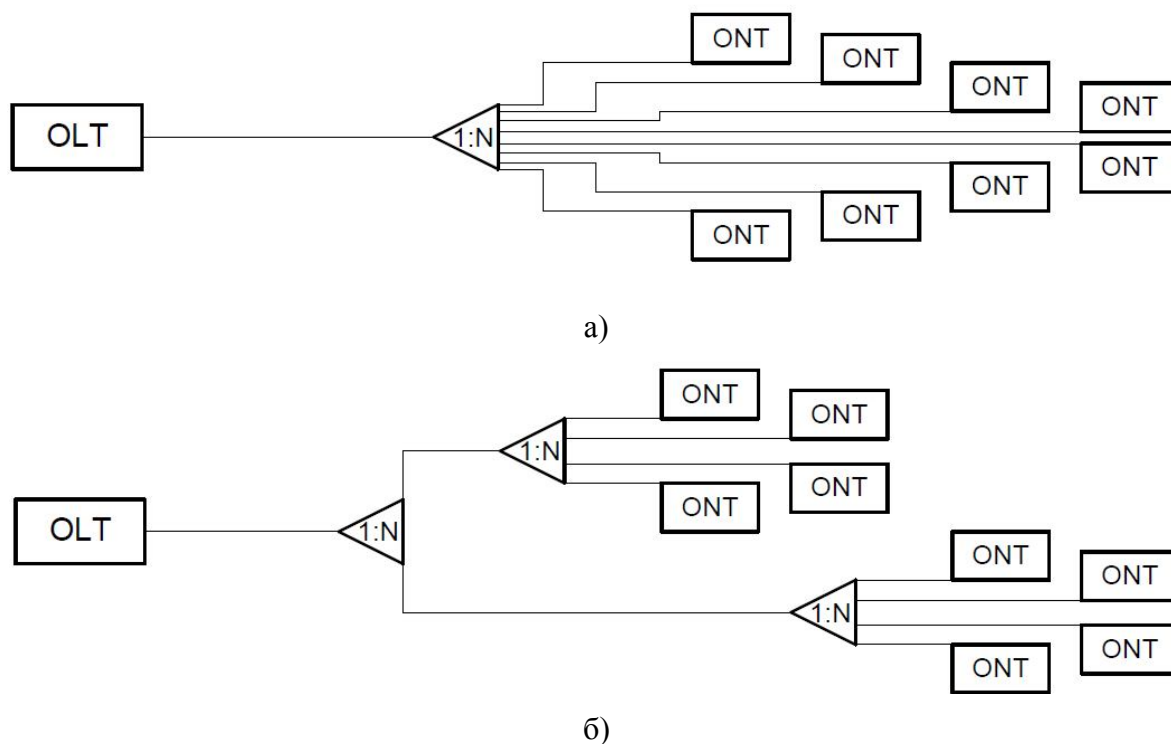


Рис. 2.4. Схемы включения сплиттеров:
 а) одноуровневая схема включения сплиттеров;
 б) многоуровневая схема включения сплиттеров

Количество уровней каскадирования сети зависит от суммарного внесистемного затухания сплиттеров, коэффициента разветвления PON интерфейсов OLT (у EPON это от 1:32 до 1:64; у GPON это от 1:64 до 1:128) и требований к полосе пропускания для каждого абонента. Чем меньше количество уровней каскадирования сплиттеров, тем проще сеть абонентского доступа и, соответственно, больше возможностей быстрого устранения не-

исправностей, повышения качества связи за счет исключения возможных переходных искажений на многоступенчатой передаче сигналов. Использование в архитектуре сети многокаскадной схемы с последовательным размещением позволяет более гибко расположить распределительные устройства и ВОК, т. е. оптимально построить сеть PON.

Линейный участок в свою очередь состоит из магистрального и распределительного участков.

Магистральный участок является одним из основных элементов всей пассивной оптической сети. Правильный выбор системы построения сети и ее топологии, определение условий и принципов организации доступа позволяют оптимизировать затраты на развитие сети в дальнейшем. На участке сети PON от АТС до ОРШ, находящегося в зоне обслуживания АТС, производится магистральное распределение ОВ. Главная задача магистрального участка – подвести требуемое количество ОВ максимально близко к сконцентрированной группе абонентов наиболее оптимальным образом с учетом топологии и емкости кабельной канализации. На абонентское окончание магистрали всегда устанавливается ОРШ, ОРК или специальная механическая оптоволоконная муфта с облегченным доступом к ОВ.

Распределительный участок – это участок от ОРШ или подъездных ОРК до этажных распределительных элементов сети в многоэтажных жилых зданиях. Распределительный ВОК выходит из ОРШ и прокладывается внутри зданий по вертикальным стоякам или в металлорукаве (поливинилхлоридной трубе) по лестничным клеткам, от подвального до чердачного помещения через все этажи здания (направление выбирается по месту). В распределительный участок входят: участок сети от уличного ОРШ до кабельного ввода в жилой дом и распределительные устройства непосредственно в жилом доме.

Абонентский участок – это персональная абонентская разводка одноволоконным ВОК (реже двухволоконным или четырехволоконным) от элементов общих распределительных устройств до оптической розетки и активного оборудования ONT в квартире абонента; или до группового сетевого узла ONU, смонтированного в офисе корпоративного клиента (участок между ОРК – ONT, как показано на рис. 2.3). В абонентский участок также входит активное оборудование на стороне абонента (ONU/ONT), которое является неотъемлемым элементом технологии PON и находится под управлением оператора. Граница ответственности оператора (точка демаркации) проходит по внутренним выходным интерфейсам устройства, либо по системе управления устройства, в случае, если устройство поддерживает функции отдельного доступа к пользовательским и операторским настройкам. Абонент не должен иметь возможности применения произвольно выбранного ONT или ONU. Индивидуальный абонентский терминал ONT или групповой сетевой узел ONU содержат вход-

ной оптический интерфейс PON. ONU/ONT могут иметь различные выходные интерфейсы типов FXS, FXO, 10/100/1000Base-T, RF в разном сочетании и количестве для подключения конечных устройств.

2.3. Топологии построения пассивных оптических сетей

Топология «звезда» (представлена на рис. 2.5) применяется при плотном расположении абонентов в районе АТС. Данная топология характеризуется минимальным количеством оптических разветвителей и единственным местом их установки. Достоинства данной топологии: удобство в обслуживании, проведении эксплуатационных измерений и обнаружения места повреждения линии.

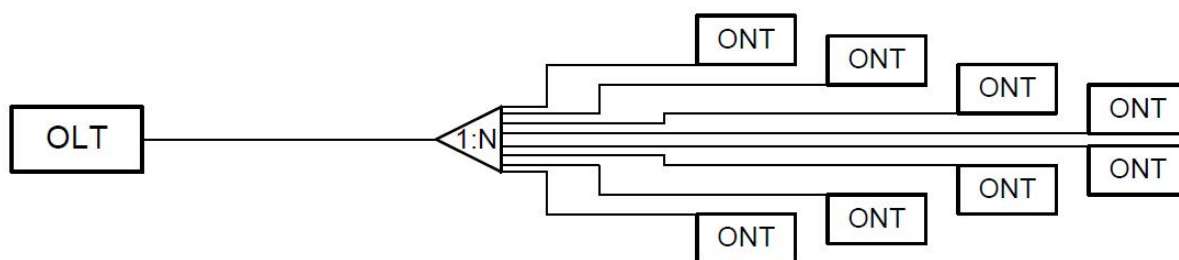


Рис. 2.5. Топология «звезда»

Топология «шина» (представлена на рис. 2.6) применяется при расположении абонентов вдоль оптической магистрали. Данная топология требует подробного расчета уровня оптического сигнала для подбора соответствующих неравномерных разветвителей (с неравномерным разделением мощности по отводам) таким образом, чтобы входная оптическая мощность на каждом оптическом приемнике соответствовала его чувствительности (диапазону входной мощности) оборудования. Топология рекомендована для применения при линейном расположении пользователей вдоль магистрали и только при небольшом количестве каскадов.

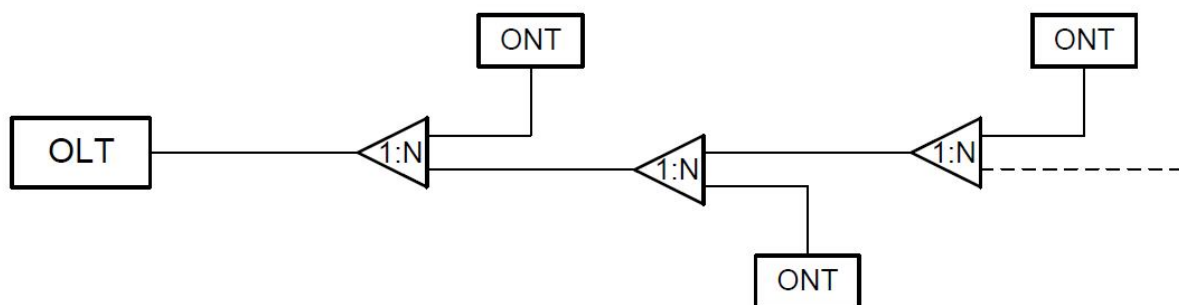


Рис. 2.6. Топология «шина» с использованием неравномерных разветвителей

Топология «дерево» (представлена на рис. 2.7) применяется при разнесенном расположении абонентов. Оптимальное распределение мощности между различными ветвями решается подбором коэффициентов деле-

ния оптических разветвителей. Древообразная топология гибкая с точки зрения потенциального развития и расширения абонентской базы.

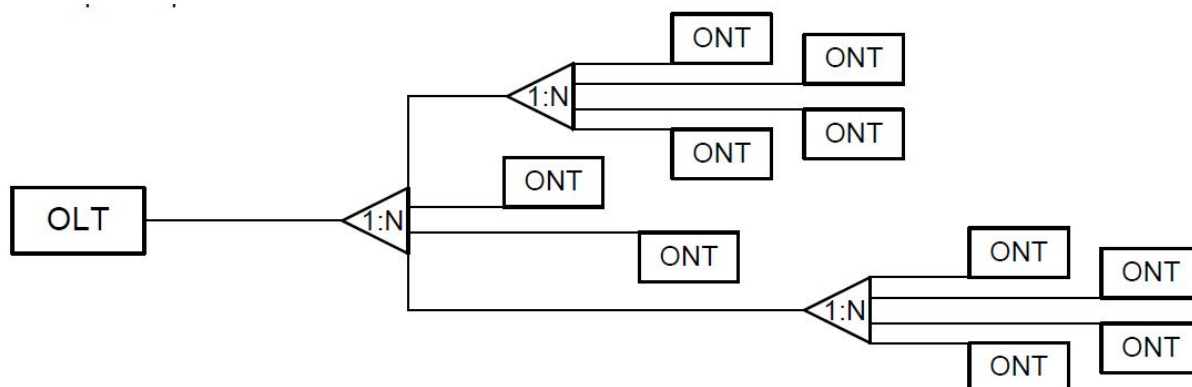


Рис. 2.7. Топология «дерево»

Каждая топология имеет свои достоинства и недостатки с точки зрения экономии ОВ, удобства тестирования, эксплуатации, обслуживания и возможности развития сети. Характеристики всех трех топологий приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сравнение основных топологий сетей PON

Характеристика топологии	Вид топологии		
	Звезда	Шина	Дерево
Экономия ОВ	Низкая	Высокая	Высокая
Тестирование и обслуживание	Диагностика из центра. Простая и точная локализация событий	Сложное диагностирование событий	Сложное диагностирование событий
География расположения абонентов	Большой разброс/ произвольное расположение	Вдоль транспортных магистралей	Кластеры/ произвольное расположение
Возможности развития	Максимальное использование свободных портов	Ограничены вдоль магистрали	Необходим правильный расчет разветвителей
Уровень принимаемого сигнала	Почти одинаковый	Разный при однотипных разветвителях	Необходим точный расчет для выравнивания
Другие достоинства/ недостатки	Массовое подключение в районах с плотным размещением абонентов	Избыточные потери разветвителей при большом числе каскадов	Наибольшая гибкость при подключении всех желающих

3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ СЕТЕЙ PON. СЕТИ СТАНДАРТОВ ITU-T G.983.x

Разработка технологии PON началась в 80-х годах прошлого века в лабораториях British Telecom. Спустя несколько лет (в 1987 г.) в Великобритании были проведены тестовые испытания. В 1995 г. несколько производителей учредили консорциум по стандартизации сети доступа с полным набором услуг (Full-Services Access-Network Group – FSAN). В него вошли более 20 ведущих мировых операторов связи и провайдеров, а также разработчики. Главной задачей для консорциума FSAN стала стандартизация PON.

В 1998 г. Международный союз электросвязи, сектор телекоммуникаций (ITU-T – МСЭ-Т) принял предложенную FSAN спецификацию ATM PON (APON) в виде рекомендаций G.983.x, утвердив вскоре в 2001 году и спецификацию Broadband PON (BPON). Начинается строительство пассивных оптических сетей в Японии и США. В дальнейшем технология PON активно совершенствуется и развивается. Технология APON (G.983.1) предусматривает передачу в сети PON ячеек ATM со скоростью 155 Мбит/с в каждом направлении. В спецификации BPON скорость передачи увеличена до 622 Мбит/с, что позволяет реализовать широкополосные сервисы, включая доступ по Ethernet и видео.

В 2003 году появляется спецификация ITU-T G.984.x новой разновидности сети с гигабитными скоростями Gigabit PON (GPON). В 2004 году выходят рекомендации Института инженеров электротехники и электроники (IEEE) по новой разновидности сети PON, использующей технологию Ethernet (EPON) со скоростью передачи 1000 Мбит/с – IEEE 802.3ah. В ноябре 2009 года был анонсирован стандарт IEEE 802.3av, предусматривающий увеличение скорости передачи до 10 Гбит/с (10G-EPON). В 2010 году анонсирована спецификация ITU-T G.987.x, описывающая технологию XG-PON.

Каждый из разработанных стандартов описывает функциональность в рамках первых двух уровней модели взаимодействия открытых систем (OSI – Open System Interconnection).

- Уровень 1 – Физический уровень модели OSI, контролирующий передачу «необработанных» битов по линии связи.
- Уровень 2 – Канальный уровень модели OSI, кодирующий и декодирующий пакеты в биты. Помимо этого, на этом уровне контролируется управление потоком данных и кадровая синхронизация. Ошибки, случающиеся на физическом уровне, корректируются также на канальном уровне.

Сравнительные характеристики основных разновидностей сетей PON приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Основные характеристики сетей PON

Характеристика	APON (BPON)	EPON	GPON
Институт стандартизации / альянс	ITU-T SG15 / FSAN	IEEE / EFMA	ITU-T SG15 / FSAN
Дата принятия стандарта	октябрь 1998	июль 2004	октябрь 2003
Стандарт	ITU-T G.983.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.984.x
Скорость передачи, прямой/обратный поток, Мбит/с	155/155 622/155 622/622	1000/1000	1244/ 155,622,1244 2488/ 622,1244, 2488
Базовый протокол	ATM	Ethernet	SDH
Линейный код	NRZ	8B/10B	NRZ
Максимальный радиус сети, км	20	20 (>30 ¹)	20
Максимальное число абонентских узлов на одно волокно	32	32 (64)	64 (128)
Приложения	Любые	IP, данные	Любые
Наличие коррекции ошибок FEC	предусмотрена	нет	необходима
Длины волн прямого/обратного потоков, нм	1550/1310 (1480/1310)	1550/1310 (1310/1310)	1550/1310 (1480/1310)
Динамическое распределение полосы	есть	Поддержка	есть
IP-фрагментация	есть	нет	есть
Защита данных	Шифрование открытыми ключами	нет	Шифрование открытыми ключами
Резервирование	есть	нет ³	есть
Оценка поддержки голосовых приложений и QoS	высокая	низкая	высокая

A-PON – самый первый вариант технологии PON, основанный на использовании протокола ATM (Asynchronous Transfer Mode – режим асинхронной передачи). Скорость нисходящего непрерывного потока ATM в технологии A-PON достигает 155 Мбит/с.

В качестве транспортной сети ATM может использовать существующие каналы SDH и PDH. ATM изначально разрабатывалась как универсальная технология, не зависящая от типа передаваемого трафика, которую могли использовать все существующие на тот момент службы, так как ATM определяет протоколы на уровнях выше физического. Это давало возможность постоянного совершенствования алгоритмов кодирования и сжатия информации. Все имеющиеся ресурсы сети в таком случае могут быть использованы всеми службами, что давало возможность их оптимального распределения, и обеспечивало высокую эффективность использования сетевых ресурсов. Так как все виды информации транспортируют-

³ Резервирование портов EPON на OLT возможно только в пределах, ограниченных количеством выходных портов на технологической микросхеме EPON.

ся одним методом, то это дает возможность проектирования, создания, управления и обслуживания одной сети, что сокращает затраты и делает ее наиболее экономичной сетью электросвязи в мире на сегодняшний день. Преимущества технологии ATM определили решение МСЭ-Т в выборе ATM в качестве стандарта режима транспортирования информации в широкополосных цифровых сетях интегрального обслуживания.

Технология ATM была разработана как единый универсальный транспорт для нового поколения сетей с интеграцией услуг, которые называются широкополосными сетями ISDN. Технология ATM с самого начала разрабатывалась как технология, способная обслужить все виды трафика в соответствии с их требованиями.

Сеть ATM имеет классическую структуру крупной территориальной сети – конечные станции соединяются индивидуальными каналами с коммутаторами нижнего уровня, которые в свою очередь соединяются с коммутаторами более высоких уровней. Коммутаторы ATM пользуются 20-байтными адресами конечных узлов для маршрутизации трафика на основе техники виртуальных каналов. Для частных сетей ATM определен протокол маршрутизации PNNI (Private NNI), с помощью которого коммутаторы могут строить таблицы маршрутизации автоматически. В публичных сетях ATM таблицы маршрутизации могут строиться администраторами вручную, как и в сетях X.25, или могут поддерживаться протоколом PNNI.

3.1. Характеристики физического уровня стандарта ВРОН

Технологией, поддерживаемой стандартом ВРОН, также является технология ATM.

Интерфейс ODN (оптической распределительной сети) соответствует физическому уровню модели OSI (Open System Interconnection – модель взаимодействия открытых систем), для которого некоторые характеристики являются стандартизованными. Скорость передачи, оптическая длина волны и формат модуляции – лишь некоторые их характеристик, которые могут быть интересны при последующем анализе. Скорости передачи для стандарта ВРОН показаны в табл. 3.2. Данные скорости передачи адаптированы из скорости кадра SDH. Каждая битовая последовательность кодируется линейным кодом NRZ со скремблированием. Основная несущая (лазер) модулируется этим кодированным сигналом. ИТУ-Т определяет несколько длин волн для несущих, используемых в ВРОН (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Длины волн, используемые стандартом ВРОН

Диапазон длин волн (окно прозрачности)	Нижний предел	Верхний предел
1300 нм полоса длин волн	1260 нм	1360 нм

Диапазон длин волн (окно прозрачности)	Нижний предел	Верхний предел
Промежуточный диапазон длин волн	1360 нм	1480 нм
Основной диапазон	1480 нм	1500 нм
Расширенный диапазон (1)	1539 нм	1565 нм
Расширенный диапазон (2)	1550 нм	1560 нм
L диапазон	1565 нм	1625 нм

Отметим, что расширенный диапазон длин волн (1,2) зарезервирован для дополнительных цифровых сервисов и передачи аналогового телевидения (длина волны 1550 нм). L-диапазон используется для возможностей диагностики и мониторинга оптической распределительной сети (длины волн 1610 нм и 1625 нм).

3.2. Формат кадра BPON

Кадры, используемые в BPON сетях, состоят из ячеек ATM физического уровня OAM (PLOAM – Physical Layer Operation, Administration and Management). Ячейки ATM используются для передачи пользовательской информации; PLOAM ячейки используются, чтобы контролировать поток информации между пользователем и передатчиком. BPON различает два типа кадров: для нисходящего и восходящего направления. Каждый кадр имеет фиксированную длительность 152,67 мкс. Вследствие этого скорости передачи 155 Мбит/с соответствует кадр размером 2968 байт, а скорости передачи 622 Мбит/с – 11872 байта. Рис. 3.1 отображает структуру кадра BPON для нисходящего и восходящего потоков на скорости 622 Мбит/с.

Ячейка PLOAM нисходящего потока имеет предопределенную структуру, состоящую из 5-байтного заголовка и 48 байт полезной нагрузки (см. рис. 3.2). Заголовок используется для идентификации PLOAM ячейки. Стандарт ITU-T I.361 определяет несколько образов заголовка. Секция полезной нагрузки заполняется данными OAM.

Помимо передачи полей GRANTS в восходящем потоке, PLOAM ячейки используются для передачи полей MESSAGE (табл. 3.3) – так называемых OAM, которые могут быть использованы для целей управления: аварийных сообщений, пороговых событий системы. Каждое сообщение состоит из нескольких полей и защищается той же CRC функцией, что и сообщения GRANTS. Устройства ONU обрабатывают подобные сообщения, если они обращены к данным ONU. Когда процедура CRC обрабатывает некорректно, данное сообщение отбрасывается.

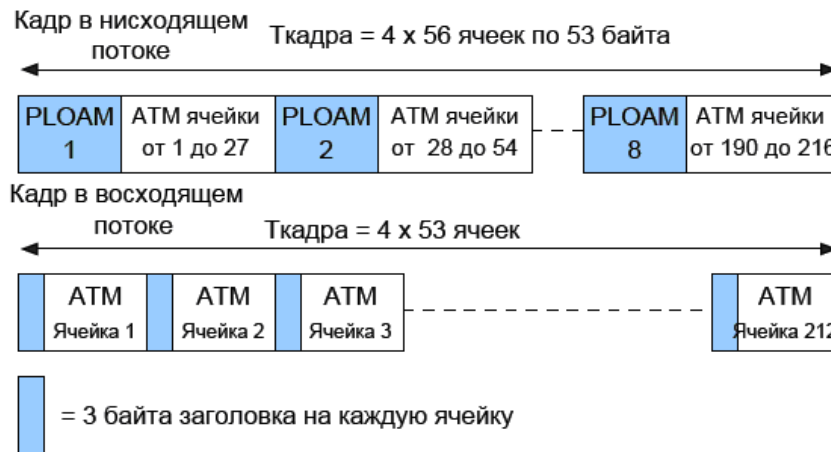


Рис. 3.1. Нисходящий и восходящий кадры BPON для скорости 622 Мбит/с

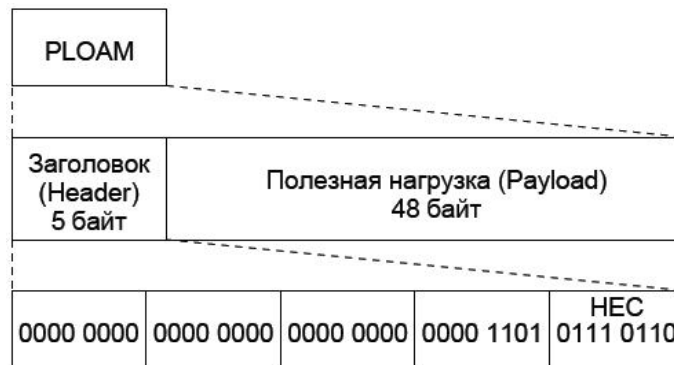


Рис. 3.2. Структура PLOAM ячейки BPON.

Таблица 3.3

Содержание поля MESSAGE в PLOAM ячейке кадра нисходящего потока

Тип поля MESSAGE	Назначение
MESSAGE PON ID	Адресуется конкретному устройству ONU. Во время процедуры ранжирования ONU ассоциируются с PON_ID от 0 до 63 (маппируются от 0x00 до 0x3F). Для широкополосного потока для всех ONU PON_ID данное поле принимает значение 0x40
MESSAGE ID	Индицирует тип сообщения
MESSAGE FIELD	Содержит непосредственно само сообщение

Для кадров BPON в восходящем потоке используется другой формат (также см. рис.3.1). Табл. 3.4 отражает содержание полей MESSAGE в PLOAM ячейке кадра восходящего потока.

Таблица 3.4

Содержание поля MESSAGE в PLOAM ячейке кадра восходящего потока

Тип поля MESSAGE	Назначение
MESSAGE PON ID	Содержит PON_ID устройства ONU, отправляющего данные. В то же время OLT знает предположительный ONU_ID, так как сгенерировало поле GRANT. Если содержание данного поля не соответствует возможным ожидаемым значениям, относящимся к данному PON_ID, данное сообщение отбрасывается
MESSAGE ID	Индицирует тип сообщения
MESSAGE FIELD	Содержит непосредственно само сообщение

В кадре восходящего потока каждой ATM ячейке предшествует 3 байта заголовка (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Содержание заголовка PLOAM ячейки восходящего потока

Тип поля заголовка	Назначение
Защитный интервал (Guard time)	Обеспечивает достаточное расстояние между двумя последовательными ячейками или минислотами для предотвращения коллизий
Преамбула (Preamble)	Выделяет фазу приходящей ячейки или минислота относительно локального времени OLT и/или входит в синхронизм и восстанавливает амплитуду
Ограничитель (Delimiter)	Уникальная комбинация, обозначающая старт ATM ячейки или минислота, которая может быть использована для байтовой синхронизации

В настоящее время сети APON и BPON уже утратили свою актуальность, при этом в России практически не использовались.

4. ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ СТАНДАРТА GPON ITU-T G.984.X

4.1. Основные принципы

В сети GPON реализуется универсальная технология, поддерживающая большое количество цифровых услуг связи. Сетям GPON посвящены рекомендации ITU-T G.984.1...G.984.4.

Наиболее важными характеристиками сети GPON на физическом уровне (1 уровень модели OSI) являются:

- скорости передачи: 1,24416 или 2,48832 Гбит/с в направлении нисходящего потока и 0,15552, 0,62208, 1,24416 или 2,48832 Гбит/с в направлении восходящего потока;
- длины волн: 1260...1360 нм в направлении восходящего потока и 1480...1500 нм в направлении нисходящего потока;
- виды трафика: цифровой в обоих направлениях;
- число волокон: 1 или 2;
- максимальный коэффициент разветвления: 64/128, ограничен затуханием в пассивной сети;
- затухание в пассивной сети между OLT и ONU/ONT с учетом всех причин (волокна, соединители, разветвители и т.д.), которое, в свою очередь, подразделяется на следующие классы:
 - класс А: диапазон затухания от 5...20 дБ;
 - класс В: диапазон затухания от 10...25 дБ;
 - класс С: диапазон затухания от 15...30 дБ;
 - класс В+: диапазон затухания от 13...28 дБ;
 - класс С+: диапазон затухания от 17...32 дБ;
 - класс С++: диапазон затухания от 17...34 дБ;
- максимальное расстояние: 20 км при использовании лазера с распределенной обратной связью (лазер DFB), 10 км при использовании лазера с резонатором Фабри-Перо.

Рис. 4.1 отображает распределение длин волн излучения и пределы изменения уровней передачи в сетях GPON в соответствии с рекомендациями МСЭ.

Согласно рекомендациям ITU-T, сети GPON предоставляют только цифровые услуги связи. Однако возможна и аналоговая передача видеосигналов.

Канальный уровень (2 уровень модели OSI) в сети GPON называется уровнем конвергенции передачи (Transmission convergence), в дальнейшем он разделяется на два подуровня: подуровень адаптации и подуровень формирования пакетов.

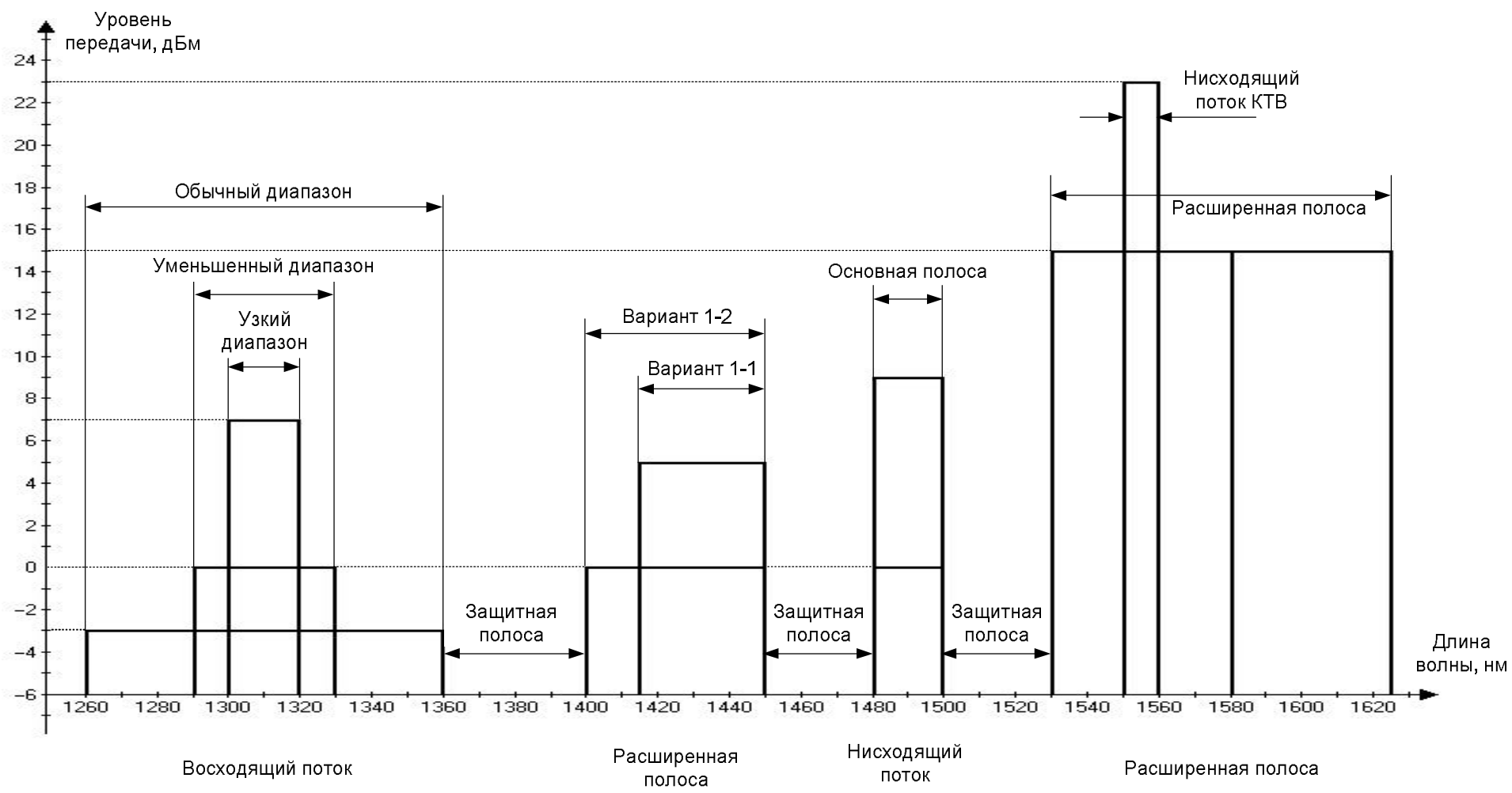


Рис. 4.1. Распределение длин волн излучения и пределы изменения уровней передачи в сетях GPON в соответствии с рекомендациями МСЭ

Уровень конвергенции передачи генерирует и обрабатывает пакеты длительностью 125 мкс. Полезная нагрузка этих пакетов состоит из двух секций:

- секция, состоящая из пакетов АТМ, имеющих длину 53 байта;
- секция, состоящая из инкапсулированных в сеть GPON пакетов. Эти фреймы могут представлять собой кадры Ethernet или, например, фреймы SDH, а также комбинацию фреймов различных типов.

Задачи адаптации и формирования фреймов, решаемые на уровне конвергенции передачи, представлены на рис. 4.2. Уровень конвергенции передачи также осуществляет управление трафиком. Например, он выдает оборудованию ONT разрешения (так называемые гранты) на отправку пакетов.

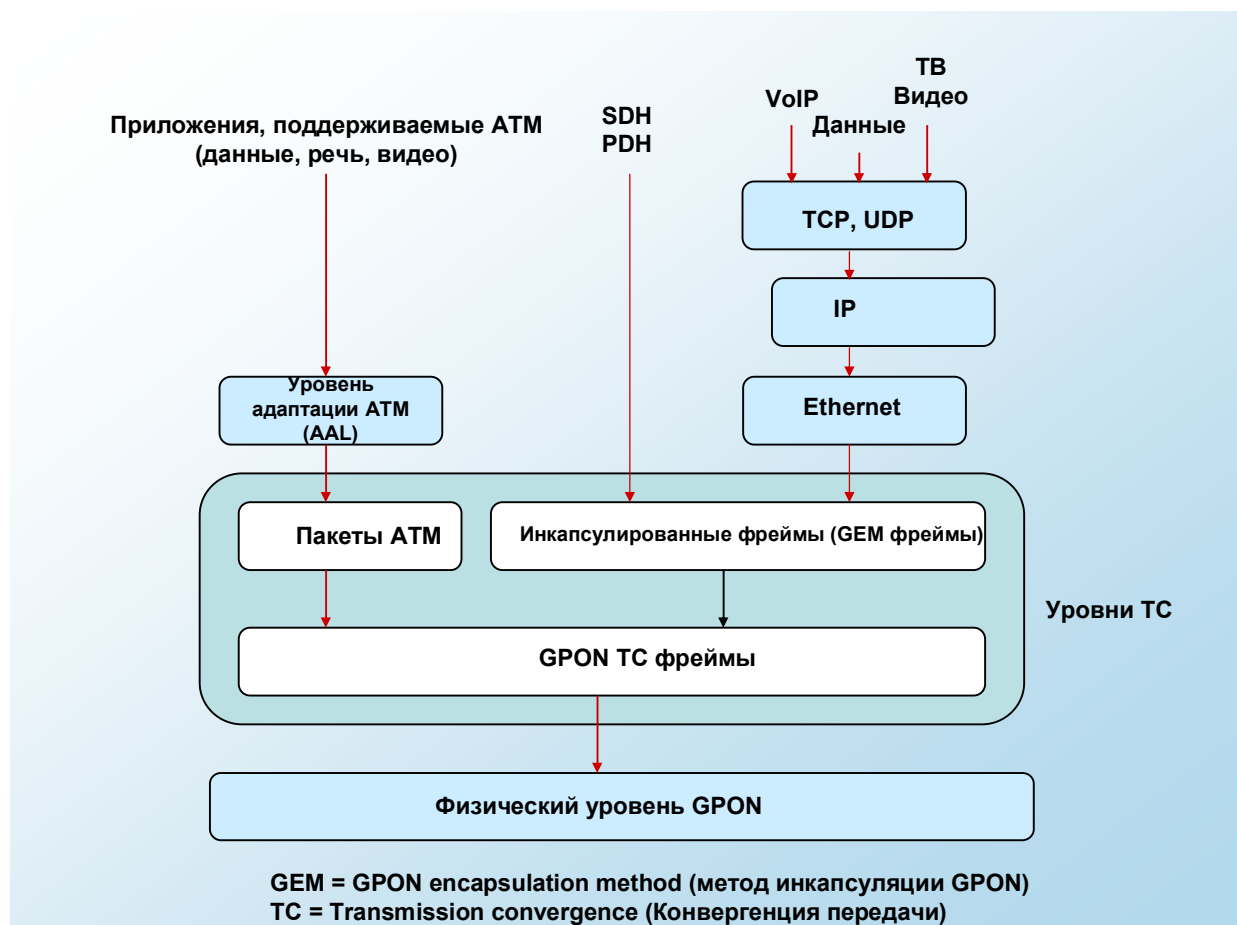


Рис. 4.2. Принципы генерации пакетов GPON

Через интерфейс WAN (Wide-Area Network – глобальная сеть) оборудования OLT сеть GPON поддерживает:

- уровни SDH: STM-1, 4 и 16;
- уровни PDH: E1, E2 и E3;
- АТМ;
- Gigabit Ethernet с приложениями IP.

Через интерфейс ONT поддерживаются:

- уровни SDH: STM-1 и 4;
- уровни PDH: E1, E2 и E3;
- ISDN BRI и PRI;
- ATM;
- Ethernet с приложениями IP (Internet, VoIP, IPTV, VoD и т.д.):
 - 10Base-T;
 - 100Base-T;
 - 1000Base-T.

В табл. 4.1 и табл. 4.2 приведены параметры передающих и приемных устройств в нисходящем потоке от OLT к ONU/ONT. В табл. 4.3. и табл. 4.4 приведены параметры передающих и приемных устройств в восходящем потоке от ONU/ONT к OLT.

Таблица 4.1

Параметры передатчика OLT в нисходящем потоке со скоростью 2488 Мбит/с

Параметр	Ед. изм.	Одно ОВ			Два ОВ		
		А	В	С	А	В	С
Длина волны	нм	1480-1500			1260-1360		
Линейный код		NRZ, скремб-лирование			NRZ, скремб-лирование		
Минимальные возвратные потери	дБ	32			32		
Класс сети		А	В	С	А	В	С
Минимальный средний уровень мощности	дБм	0	+5	+3	0	+5	+3
Максимальный средний уровень мощности	дБм	+4	+9	+7	+4	+9	+7
Минимальный коэффициент экстинкции	дБ	10			10		
Максимальная среднеквадратиче-ская ширина спектра излучения для:	нм						
многомодового лазера	нм	не задается			не задается		
одномодового лазера	нм	1			1		
Минимальный коэффициент по-давления боковых мод	дБ	30			30		

Таблица 4.2

Параметры приемника ONT в нисходящем потоке со скоростью 2488 Мбит/с

Параметр	Ед. изм.	Одно ОВ			Два ОВ		
		А	В	С	А	В	С
Максимальная отражательная способность	дБ	-20			-20		
Линейный код		NRZ, скремблирование			NRZ, скремблирование		
Класс сети		А	В	С	А	В	С
Минимальная чувствительность	дБм	21	21	28	21	21	28
Минимальная перегрузка	дБм	1	1	8	1	1	8

Таблица 4.3

Параметры передатчика ONT в восходящем потоке со скоростью 1244 Мбит/с

Параметр	Ед. изм.	Одно ОВ			Два ОВ						
		А	В	С	А	В	С				
Рабочая длина волны	нм	1260-1360			1260-1360						
Линейный код		NRZ, скремблирование			NRZ, скремблирование						
Минимальные возвратные потери	дБ	32			32						
Класс сети		А	В	С	А	В	С				
Минимальный средний уровень мощности	дБм	-3	-2	+2	-3	-2	+2				
Максимальный средний уровень мощности	дБм	+2	+3	+7	+2	+3	+7				
Минимальный коэффициент экстинкции	дБ	10			10						
Максимальная среднеквадратическая ширина спектра излучения для:	нм	не задается			не задается						
	многомодового лазера							нм	1		
	одномодового лазера							нм	1		
Минимальный коэффициент подавления боковых мод	дБ	30			30						

Таблица 4.4

Параметры приемника OLT в восходящем потоке со скоростью 1244 Мбит/с

Параметр	Ед. изм.	Одно ОВ			Два ОВ		
		А	В	С	А	В	С
Минимальная отражательная способность	дБ	20			20		
Коэффициент ошибок BER		10^{-10}			10^{-10}		
Класс сети	-	А	В	С	А	В	С
Минимальная чувствительность	дБм	24	28	29	24	28	29
Минимальная перегрузка	дБм	3	7	8	3	7	8

В ранних рекомендациях ITU-T G.984.2 предлагается использовать в сетях GPON диапазон длин волн 1480–1500 нм для нисходящего потока и 1260–1360 нм для восходящего потока. На рис. 4.3 показано рекомендованное G.984.5 распределение длин волн в сетях GPON. Оно включает зарезервированные диапазоны длин волн для дополнительных услуг NGA (Next Generation Access) и видео V.

Диапазон длин волн 1480–1500 нм нисходящего потока G-PON назван «основная полоса» (basic band). Зарезервированные полосы названы «расширенная полоса» (enhancement band). Расширенная полоса используется для NGA и видеослужб. Диапазон длин волны для видеослужб определен в рекомендации МСЭ G.983.3 и сохранен последующими рекомендациями.

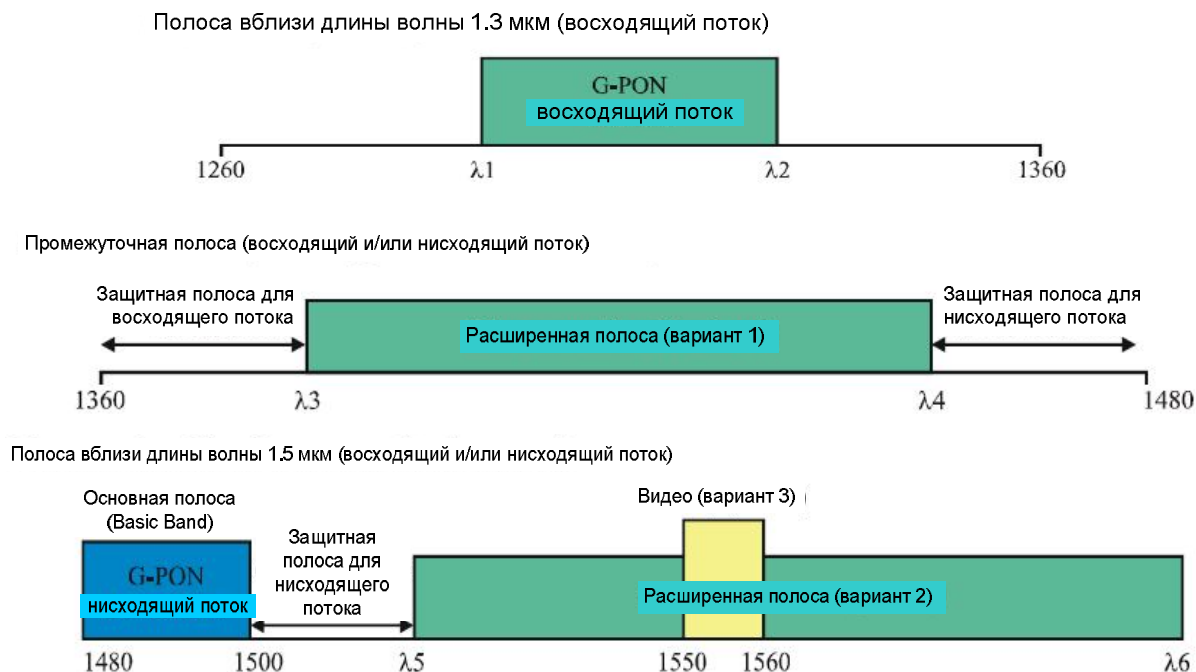


Рис. 4.3. Распределение длин волн в сетях GPON

Защитная полоса (guard band) отделяет диапазон восходящего потока G-PON и/или основную полосу от полосы расширения. Взаимные влияния между сигналами в этих двух полосах приводит к искажениям, которые должны оставаться незначительными. Для получения необходимой изоляции вне защитной полосы используются блокирующие полосовые фильтры WBF.

4.2. Физический уровень GPON

Данный уровень имеет стандартизованное название GPON Physical Media Dependent (GPM). На этом уровне происходит электрооптическое и оптоэлектронное преобразование. Данный стандарт предусматривает несколько скоростей передачи.

Максимальное логически достижимое расстояние между OLT и ONU/ONT составляет 60 км. Эта дистанция ограничена имплементацией и спецификацией аппаратного обеспечения. Если к OLT подключено множество устройств ONU/ONT, то каждое из них (ONU-х/ONT-х, ONU-у/ONT-у и т.д.) будет находиться на различном расстоянии от OLT. Этот предел называется дифференциальным логическим пределом и не превышает 20 км по причине максимального окна ранжирования (ranging window).

Коэффициент разветвления стандартизуется значением 1 к 64 (на данный момент до 128 и выше). Текущее соотношение ограничивается выходной мощностью передатчика OLT, потерями в оптическом тракте, так как суммарная мощность разделяется между всеми подключенными пользователями ONU/ONT. Для гарантии достаточной мощности для каждого пользователя специфицирован конкретный максимум.

4.3. Канальный уровень GPON Transmission Convergence

Уровень GTC используется для контроля среды доступа (MAC – Media Access Control). Таким образом, контролируется доступ пользователей к разделенной среде передачи. Для стандарта GPON доступ осуществляется посредством специальных указателей – контейнеров для передачи (T-CONT – Transmission Container). Каждый T-CONT дает разрешение ONU/ONT отправить свои данные к OLT в назначенный период времени. Для такой поочередной модели существует пять типов указателей T-CONT1–T-CONT5, каждый со своей собственной приоритезацией. В зависимости от факторов, относящихся к качеству обслуживания (QoS – Quality of Service) и требований пользователя данные T-CONT могут быть назначены устройству ONU/ONT. Детальное описание данной процедуры дано в стандарте ITU-T G.984.4.

Уровень кадрирования GTC отвечает за мультиплексирование/демультиплексирование потоков информации. Этот уровень создает

заголовки кадров и поддерживает внутреннюю маршрутизацию. Уровень GTC может быть разделен на два подуровня – подуровень кадрирования GTC и подуровень адаптации транспортной конвергенции. Подуровень кадрирования составляет кадры GPON из информационных данных и вставляет кадры в индивидуальные информационные пакеты. Для выполнения этого подуровень кадрирования взаимодействует с клиентом PLOAM и подуровнем адаптации транспортной конвергенции.

4.3.1. Нисходящий поток уровня GTC

Помимо участия в контроле доступа к среде передачи (MAC), уровень GTC управляет процессом кодирования и декодирования кадров GPON. Нисходящие GPON кадры имеют формат, указанный на рис 4.4. Кадр состоит из заголовка и секции полезной нагрузки. Заголовок называется физическим блоком управления в нисходящем направлении (Physical Control Block downstream – PCBd). Секция полезной нагрузки содержит фактическую информацию, которая должна быть передана. Поле PCBd заполняется полностью для управления и информирования ONU/ONT.



Рис. 4.4. Кадр GPON в нисходящем направлении

Длительность кадра равна 125 мкс. Количество бит, которое может быть передано, зависит от скорости передачи. Обзор предельного количества байт, которое может быть передано в пределах одного кадра, отображен в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Длина кадра GPON в нисходящем направлении

Скорость передачи информации, Гбит/с	Длина кадра, байт
1,24416	19440
2,48832	38880

Структура заголовка PCBd показана на рис. 4.5.



Рис. 4.5. Обзор заголовка PCBd

Поля заголовка PCBd выполняют следующие функции:

- PSync – синхронизация физического уровня (pSync) – содержит предопределенную статическую комбинацию. Используется

ONU/ONT для синхронизации входящего битового потока. Статическая комбинация соответствует стандарту ITU-T и эквивалентна 0xB6AB31E0;

- Ident – идентификатор кадра. Содержит 4 байта, разделенные на два однобитных и одно тридцатибитное поле. Первый бит информирует ONU/ONT, если информация закодирована посредством FEC. Вторым одиночным битом является резервным. Оставшиеся 30 бит – это так называемый «счетчик сверхкадра, который отслеживает каждый переданный кадр и, таким образом, увеличивается номер каждого последующего кадра;
- VIP – результат проверки всех битов на четность с чередованием по битам, переданным после последнего VIP;
- PLOAMd – поле содержит сообщение эксплуатации, управления и технического обслуживания физического уровня;
- Plend – поле длины полезной нагрузки нисходящего потока (передается дважды для защиты от ошибок). Это поле состоит из двух частей, 12-битных полей BWMap Length и ATM Partition Length;
- BWmap – карта распределения пропускной способности для восходящего потока для каждого контейнера передач.

4.3.2. Восходящий поток уровня GTC

Для восходящего потока GPON стандартом ITU-T определен другой формат кадра. Он также состоит из заголовка и секции полезной нагрузки.

Кадр восходящего потока состоит из ряда блоков от одного или более ONU/ONT. Длина кадра равна 125 мкс. Карта распределения пропускной способности для восходящего потока для каждого контейнера передач (BWmap) определяет порядок передачи этих блоков в соответствии с их идентификатором (Alloc-ID).

Кадр восходящего потока может содержать данные следующего типа:

- администрирование и управление в процессе эксплуатации физического уровня восходящего потока (PLOAMu);
- сообщения о динамической пропускной способности восходящего потока (DBRu);
- данные пользователя или интерфейса управления OMCI.

Структура кадра восходящего потока (рис. 4.6) состоит из следующих полей:

- PLOu – заголовок физического уровня;
- PLOAMu – администрирование и управление в процессе эксплуатации физического уровня восходящего потока. Поле Start Time, приведенное в нисходящем потоке, показывает границу данного восходящего потока, начиная с поля PLOAMu;
- DBRu – сообщение о динамической пропускной способности восходящего потока;
- полезная нагрузка – данные. Поле состоит из кадров GEM.

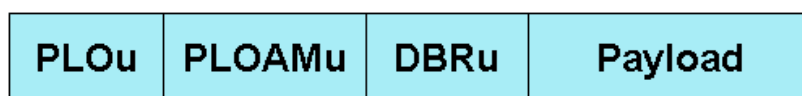


Рис. 4.6. Структура кадра восходящего потока

Структура заголовка PLOu приведена на рис. 4.7.

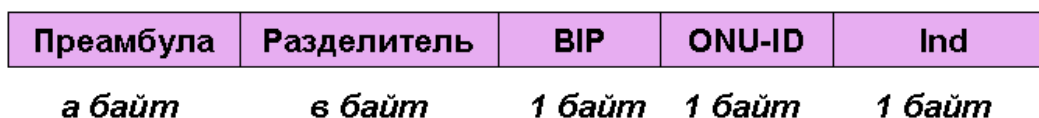


Рис. 4.7. Структура заголовка физического уровня восходящего потока

Поля заголовка PLOu выполняют следующие функции:

- преамбула и разделитель формируются в соответствии с правилами, заданными в сообщении OLT «upstream_overhead» и «extended_burst_length»;
- ВР – результат проверки всех битов на четность с чередованием по битам, переданным после последнего ВР, за исключением битов преамбулы и разделителя;
- ONU-ID – уникальный идентификатор ONU/ONT, значение равно от 0 до 253;
- Ind – индикация состояния ONU/ONT;
- поле Ind принимает значения от 0 до 7.

Структура сообщения PLOAMu приведена на рис. 4.8.

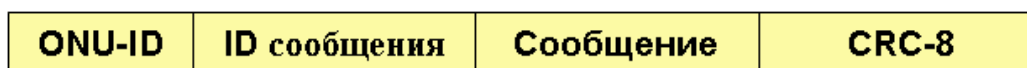


Рис. 4.8. Структура поля администрирования и управления в процессе эксплуатации физического уровня восходящего потока

Поля сообщения PLOAMu выполняют следующие функции:

- ONU-ID – уникальный идентификатор ONU/ONT, значение равно от 0 до 253;
- ID сообщения – тип сообщения; сообщение – содержит сообщение PLOAM;
- CRC – контрольная сумма.

Структура сообщения DBRu приведена на рис. 4.9.

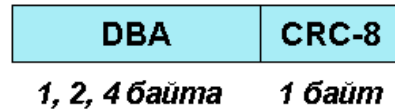


Рис. 4.9. Структура поля динамической пропускной способности

Состав сообщения DBRu:

- DBA – состояние трафика соответствующего T-CONT. Состоит из сообщения DBA и заполнителя;
- CRC – контрольная сумма.

Полезная нагрузка кадра GPON в восходящем направлении

Поле полезной нагрузки кадра восходящего потока (данные) может переносить три типа данных, как определено ИТУ-Т: ячейки АТМ, GEM кадры или отчеты DBA. Ячейки АТМ имеют формат кадра, определенный стандартом ИТУ-Т I.361. Эти ячейки АТМ заполняются на верхнем уровне и отправляются интерфейсом АТМ абонентского устройства ONU/ONT. Каждая ячейка АТМ претендует на 53 байта поля полезной нагрузки; если при этом остается свободное место, то оставшиеся байты заполняются незначительной информацией.

GPON представляет и вводит новый формат кадра для формирования пакета (инкапсуляция), называемый GPON Encapsulation Method (GEM). Структура пакета GEM приведена на рис. 4.10.

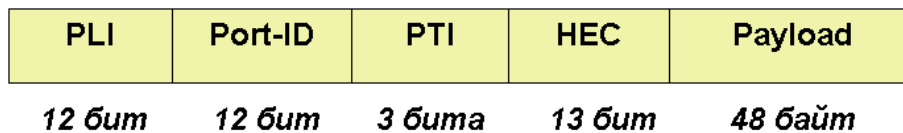


Рис. 4.10. Структура пакета GEM

Поля внутри структуры пакета GEM выполняют следующие функции:

- PLI – длина полезной нагрузки;
- Port-ID – идентификатор GEM-порта;
- PTI – тип содержимого фрагмента полезной нагрузки;
- HEC – контроль ошибок заголовка GEM;
- Payload – фрагментированная полезная нагрузка.

Отправка кадров GEM осуществляется при использовании GEM интерфейса абонентских устройств ONU/ONT. Подобно ячейкам ATM, они должны быть наполнены информацией заранее. Поскольку кадры GEM являются GPON-специфическими, ИТУ-Т специфицировал некоторые сценарии распределения и заполнения информацией кадров GEM при передаче как трафика TDM (рис. 4.11), так и трафика Ethernet (рис. 4.12).

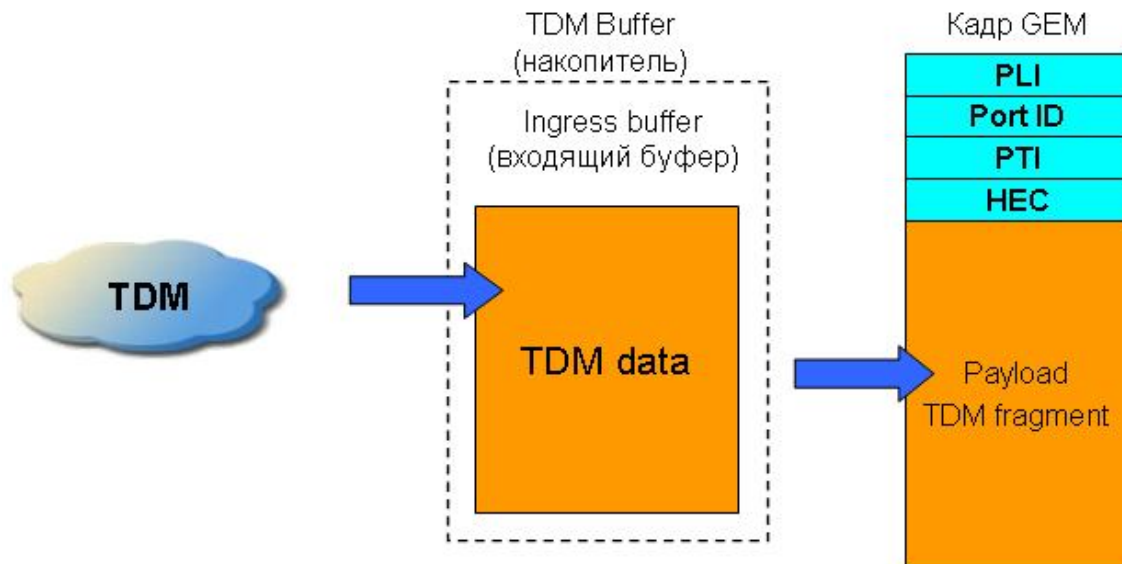


Рис. 4.11. «Упаковка» TDM-сервисов в GPON

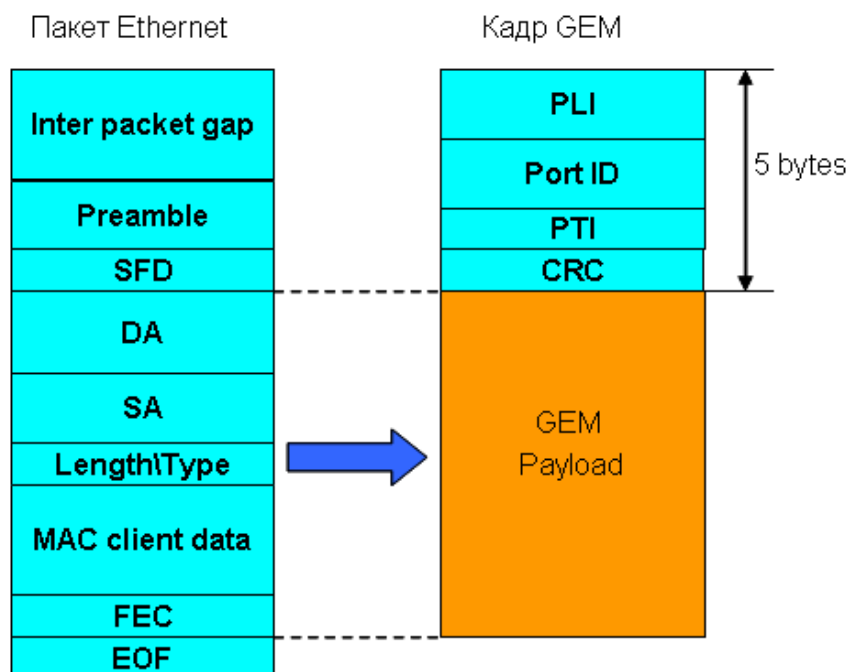


Рис. 4.12. «Упаковка» Ethernet-сервисов в GPON

5. ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ СТАНДАРТОВ 1G-EPON, 10G-EPON (IEEE 802.3ah, IEEE 802.3av)

Необходимо отметить, что топология и архитектура сети EPON на физическом уровне не отличается от сети GPON. Это позволяет при разработке ДОК для передачи телеметрической информации в сетях PON использовать единые технические решения. В настоящее время стандарты IEEE регламентируют параметры сетей с максимальными скоростями передачи 1 и 10 Гбит/с. Различают следующие разновидности сетей EPON: 1/1G-EPON, 10/1G-EPON, 10/10G-EPON. Первая цифра обозначает скорость передачи в Гбит/с для нисходящего потока, а вторая для восходящего потока. Все разновидности сетей EPON поддерживают передачу по протоколам Ethernet с меньшими скоростями: 100, 10 Мбит/с и меньше. Для оптической передачи предлагается использовать те же длины волн, что и для сетей GPON, т.е. 1490 нм для нисходящего и 1310 нм для восходящего потока.

5.1. Сети стандарта IEEE 802.3ah (1G-EPON)

Пассивная оптическая сеть, описанная в стандарте IEEE 802.3ah, называется EPON (Ethernet Passive Optical Network). Сеть EPON также как и GPON имеет топологию точка-многоточка (point-to-multipoint – P2MP).

Важнейшие физические характеристики разновидностей EPON приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Физические характеристики сети EPON (1G-EPON)

Характеристика	1000BASE-PX10-U	1000BASE-PX10-D	1000BASE-PX20-U	1000BASE-PX20-D
Тип волокна	Одномодовое волокно IEC 60793-2: B1.1, B1.3 (ITU-T G.652.D)			
Число волокон	1			
Длина волны	1310 нм	1490 нм	1310 нм	1490 нм
Направление передачи	Восходящий поток	Нисходящий поток	Восходящий поток	Нисходящий поток
Макс. расстояние	10 км		20 км	
Макс. затухание	20 дБ	19,5 дБ	24 дБ	23,5 дБ
Миним. затухание	5 дБ		10 дБ	

К особенностям сетей EPON можно отнести отсутствие в стандартах прямых рекомендаций по предоставлению абонентам в качестве дополнительной услуги аналогового телевидения, хотя в литературе сообщается о предоставлении таких услуг. Максимальный коэффициент деления разветвителя не превышает 1:64 (в современных инсталляциях до 1:128), а максимальное расстояние 20 км. Стандарт EPON допускает использование

стандартных ОВ с водяным пиком поглощения и без него. Параметры сети EPON приведены в табл. 5.2.

На рис. 5.1 показана структура преобразования сигналов в сети EPON от OLT к ONU/ONT. Параметры передающих и приемных устройств сети EPON, которые устанавливаются в OLT и ONU/ONT, приведены в табл. 5.2 и 5.3 соответственно.

Таблица 5.2

Параметры передающих устройств сети EPON

Параметр	Тип сети			
	1000BASE-PX10-D	1000BASE-PX20-D	1000BASE-PX10-U	1000BASE-PX20-U
Направление потока	Нисходящий		Восходящий	
Длина волны, нм	1480-1500		1260-1360	
Макс. уровень средней излучаемой мощности, дБм	+2	+7	+4	+4
Мин. уровень средней излучаемой мощности, дБм	-3	+2	1	1
Коэффициент экстинкции, дБ	6	6	6	6

Таблица 5.3

Параметры приемных устройств сети EPON

Параметр	Тип сети			
	1000BASE-PX10-D	1000BASE-PX20-D	1000BASE-PX10-U	1000BASE-PX20-U
Направление потока	Нисходящий		Восходящий	
Длина волны, нм	1480-1500		1260-1360	
Макс. коэффициент ошибок	10^{-12}			
Макс. чувствительность, дБм	24	27	24	24
Перегрузка, дБм	1	6	3	3
Отражательная способность, дБ	12			

Как видно из табл. 5.1, сеть EPON (1G-EPON) использует для связи одно волокно. Скорость передачи в обоих направлениях составляет 1000 Мбит/с или 1 Гбит/с. Для передачи сигналов в разных направлениях используются разные длины волн. Как и во всех пассивных оптических сетях PON, сетевое оборудование узла доступа сети 1G-EPON называют оптиче-

ским линейным терминалом OLT, а оборудование абонентского узла – оптическим сетевым устройством ONU/ONT.

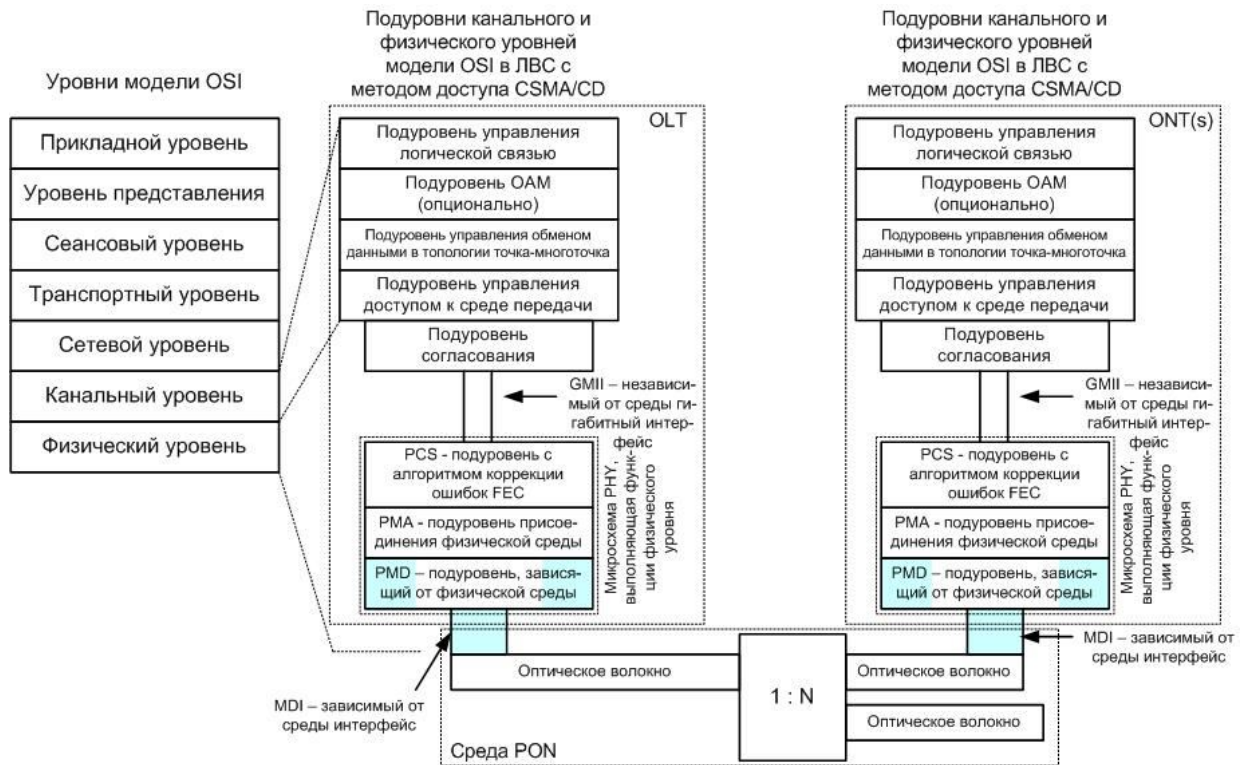


Рис. 5.1. Архитектура сети EPON (1G-EPON)

Для управления трафиком сети EPON необходим дополнительный протокол канального уровня (2 уровень модели OSI), в качестве которого используется протокол Multipoint MAC Control (MPMC). Протокол MPMC использует для управления трафиком три типа сообщений длиной 64 байта: GATE (строб), REPORT (уведомление) и REGISTER (регистрация). Сообщение GATE передается от оборудования OLT к ONT и содержит информацию о начале и длительности временного интервала, зарезервированного для посылаемых оборудованием ONT кадров. В сообщении GATE используется информация, полученная в сообщении REPORT, которое посылается оборудованием ONT. Сообщение REPORT содержит информацию о количестве байт данных в буфере ONT и предупреждает оборудование OLT, что ONT подключилось к сети. Оборудование OLT также использует протокол MPMC для определения времени распространения и расстояния до каждого ONT. Информация о времени распространения необходима для выделения временных интервалов оборудованию ONT.

Сильной стороной сети EPON является естественная поддержка всех приложений Ethernet без преобразования протоколов или расщепления кадров с их последующей инкапсуляцией. Благодаря технологии Ethernet работа IP-приложений в сети становится легкой, гибкой и экономически эффективной. Такими IP-приложениями являются:

- широкополосный Интернет и связанные с ним приложения и услуги;
- IP-телефония (VoIP);
- IP-телевидение (IPTV) – действительно цифровое телевидение;
- Основанные на протоколе IP услуги видео по требованию (VoD).

Будучи частью стандарта IEEE 802.3, семейство технологий EPON совместимо:

- с классификацией и системой приоритетов услуг, описанными в стандарте IEEE 802.1D;
- виртуальными локальными сетями (Virtual Local Area Network – VLAN), описанными в стандарте IEEE 802.1Q.

Классификация услуг основана на использовании информации о приоритете длиной 3 бита, с помощью которых можно определить $2^3 = 8$ классов услуг. Стандартом IEEE 802.3D рекомендуются классификация и система приоритетов услуг, приведенные в табл. 5.4.

Технология VLAN используется для создания независимых логических групп внутри одной физической сети. Эти группы могут формироваться из пользователей, групп пользователей, приложений или оборудования.

Таблица 5.4

Приоритеты услуг в соответствии со стандартом IEEE 802.1D

Приоритет	Код приоритета	Услуга
Наивысший	111	Управление сетью. Передача кадров маршрутных протоколов, например, SNMP, RIP)
-	110	Речь. Передача данных, критичных к задержке (< 10 мс), например, при интерактивных переговорах (VoIP)
-	101	Видео. Передача данных, критичных по задержке (< 100 мс), например, при интерактивных видео обменах (IPTV, VoD).
-	100	Гарантированная доставка (Controlled load). Работа в ситуации, некритической к задержке, но критической по потерям (например, деловой трафик, поточный трафик с резервированием).
-	011	Нормальная (не гарантированная) доставка с более высоким приоритетом, чем Best effort (Excellent effort). Работа в ситуации, некритической к задержке, но критической к потерям. Этот режим может использоваться для привилегированных клиентов.
-	000 (по умолчанию)	Нормальная (не гарантированная) доставка (Best effort). Это обычный трафик локальных сетей, например, web-сервис
-	010	Зарезервирован на будущее
Наинизший	001	Фоновый режим (Background). Массовые пересылки данных.

Согласно стандарту IEEE 802.1Q, посвященному технологии VLAN, к кадру Ethernet добавляется поле VLAN длиной 4 байта. Это поле содержит информацию о приоритете длиной 3 бита, описанную выше, и идентификатор VLAN (VLAN ID) длиной 12 бит. Использование идентификатора VLAN позволяет внутри одной физической сети создать $2^{12} = 4096$ виртуальных локальных сетей.

Виртуальные локальные сети VLAN работают точно также как и отдельные локальные сети. Между сетями VLAN исключается нежелательный трафик, что позволяет достичь безопасности данных различных пользователей и групп пользователей. Это важнейший аспект, так как одна физическая сеть может объединять индивидуальных абонентов, компании и общественные организации. Увеличилось число сотрудников, работающих вне предприятия, люди все больше работают дома, поэтому возросло значение компаний, предоставляющих услуги связи между домами сотрудников и предприятиями.

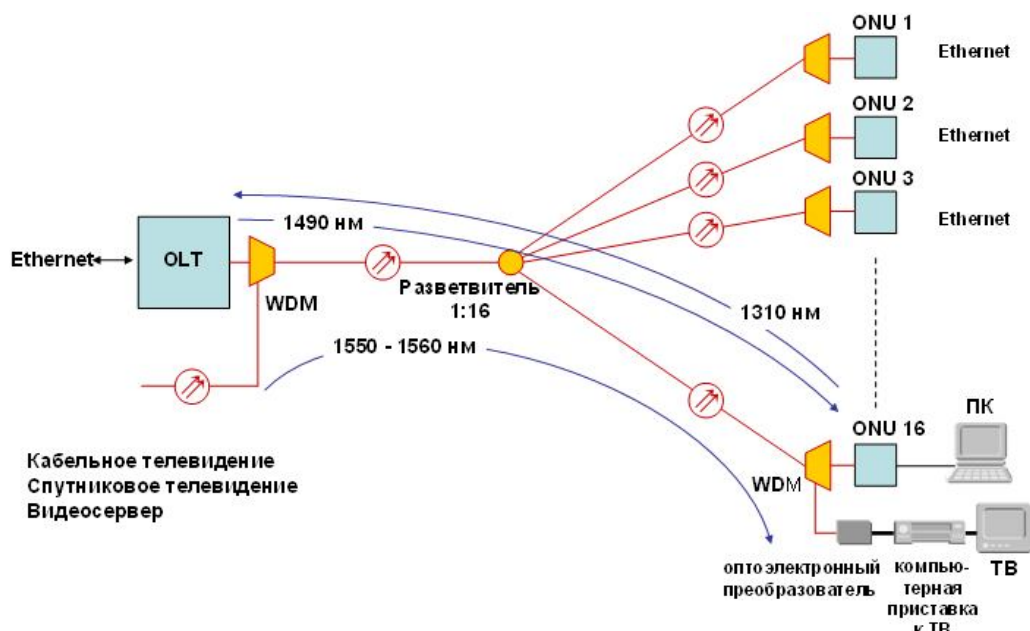


Рис. 5.2. Сеть EPON, предоставляющая услуги аналогового (AM-VSB) или цифрового (DVB-C) телевидения

Согласно стандарту IEEE 802.3ah сеть EPON предназначена только для цифровой связи, а именно для передачи кадров Ethernet. Однако, поскольку сети EPON являются оптическими, они физически могут использоваться и для других приложений, в том числе для аналоговой передачи видео (например, телевидения). Для этой цели используется диапазон длин волн 1550 – 1560 нм. Рис. 5.3 показывает, как сеть EPON используется для передачи аналогового (AM-VSB) или цифрового (DVB-C) телевизионного сигнала.

Формат кадра EPON

Для систем EPON существует два основных типа кадра: кадр данных и кадр управления. Кадр данных необходим для транспортировки пользовательского трафика. Кадр управления – для конфигурации EPON системы. Доступ к сети P2MP устанавливается с помощью MPCP, который соединяется и конфигурируется MPCPDU кадрами, составленными из стандартных кадров MAC управления IEEE 802.3. Структура MPCPDU показана на рис. 5.3. Эти контрольные пакеты фильтруются на уровне MPCP и не направляются на вышестоящие уровни. Кадры управления идентифицируются определенным значением Opcode (operational code) в соответствующем поле структуры кадра (см. табл. 5.5).

Код операции, операционный код, опкод – часть машинного языка, называемая инструкцией и определяющая операцию, которая должна быть выполнена.

Таблица 5.5

Операционные коды сообщений кадров управления

Название управляющего сообщения	Назначение
GATE MPCPDU = 0x0002	OLT → ONT. Назначение TS.
REPORT MPCPDU = 0x0003	ONT → OLT. Информирование OLT о потребностях в полосе пропускания для ONT; мониторинг работоспособности канала; расчет RTT – Round Trip Time – времени приема-передачи.
REGISTER_REQ MPCPDU = 0x0004	ONT → OLT. Уведомление о том, что ONT хочет зарегистрироваться в сети.
REGISTER MPCPDU = 0x0005	OLT → ONT после получения REGISTER_REQ. Информация о сети для корректной работы в ней ONT.
REGISTER_ACK MPCPDU = 0x0006	ONT → OLT. Подтверждение получения REGISTER_REQ. С этого момента ONT – часть сети и соединяется с конкретным OLT.

Сообщения GATE и REPORT генерируются из кадра и имеют общую длину – 64 байта. GATE MPCPDU состоит из стандартных MAC и следующими за ними полей. Поле “Grants/Flags” является 8-битным регистром, используемым для информирования ONU/ONT. Поле “Grant #1 Start time” используется для информирования ONU о том, когда разрешено передавать информацию. Поле “Grant Length” указывает ONU, какой длины сообщение оно может передать, значения поля “Grant Length” включает следующие поля: «период включения лазера», «период синхронизации», «период выключения лазера». Поле «время синхронизации» используется для синхронизации с OLT только в продолжение процедуры обнаружения (Discovery).

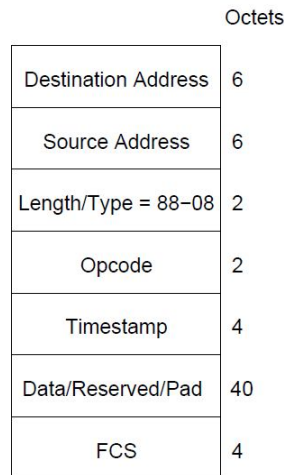


Рис. 5.3. Структура MPCPDU

REPORT MPCPDU также строится из стандартных MAC и следующими за ними полей. Поля установок количества очередей (“Number of Queue sets”) используются для индикации количества запросов в сообщении REPORT. Таким образом, может быть множество запросов в едином сообщении. Поля “Report bitmap” содержат информацию об очередях (от 0 до 7). Каждое поле “Queue #n Report” отражает длину очереди #n в момент генерации Report сообщения. Поле “Pad/Reserved” заполняется нулями для заполнения неиспользуемого пространства, зависящего в свою очередь от количества Report данных (от 0 до 39). Регистры MPCPDU, REQ MPCPDU, ACK MPCPDU используются для целей регистрации ONU/ONT.

Для пользовательской информации используется стандартный кадр MAC (рис. 5.4). Он может быть размером 1526 байт, при этом содержать до 1500 октетов пользовательских данных.

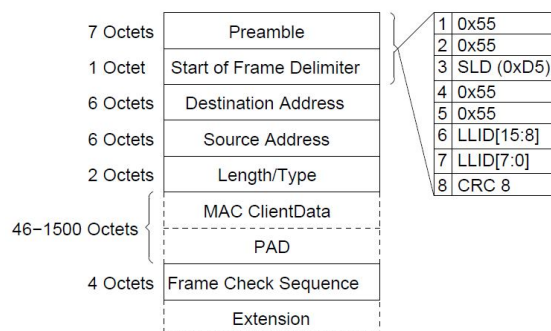


Рис. 5.4. Структура кадра MAC

В стандартной Ethernet интерпретации каждый кадр Ethernet передается с преамбулой (“Preamble”) и ограничителем начала кадра (“Start of Frame Delimiter – SFD”) в начале. Эти поля занимают 8 байт и используются как последовательности тактовых импульсов для приемника кадра. Как

описано выше, в EPON стандартный уровень MAC расширяется так называемым уровнем MPCP, позволяющим иметь на стороне OLT множество MAC сущностей (инстанций, адресов). Каждая из этих MAC сущностей соответствует подключенному ONU/ONT, идентифицируемому с помощью LLID – между OLT и ONU/ONT создается виртуальный путь. Созданные виртуальные пути требуют дополнительных параметров адресации для маршрутизации принятой информации к соответствующим MAC сущностям. Для этой цели используются значения LLID, которые должны быть инкапсулированы в информационные кадры. В EPON для этого используются поля “Preamble/SFD” (рис. 5.4.). Поля начала ограничителя LLID, LLID и CRC8 вставляются в преамбулу; другие поля остаются со значением 0x55. Величина CRC8 позволяет проверить ошибки при передаче полей 3-7.

При нисходящем потоке ONU/ONT отбрасывает кадры с несоответствующими LLID: только кадры с допустимым LLID направляются на верхние уровни. На стороне OLT каждый восходящий кадр обрабатывается MAC сущностью, имеющей тот же самый LLID, что и обрабатываемый кадр.

5.2. Сети стандарта IEEE 802.3av (10G-EPON)

В связи с резко возрастающими потребностями в увеличении полосы пропускания IEEE в ноябре 2009 года разработала стандарт IEEE 802.3av, который является расширением существующего стандарта IEEE 802.3ah EPON до скоростей 10 Гбит/с как в симметричном режиме (10 Гбит/с в восходящем и нисходящем направлении), так и в асимметричном режиме (10 Гбит/с в нисходящем и 1 Гбит/с в восходящем направлении). Стандартом поддерживаются следующие скорости передачи:

- 10.3125 Гбит/с в нисходящем направлении (DS);
- 10.3125 Гбит/с в восходящем направлении (US).

Нисходящий и восходящий потоки передаются через единое ОВ в сети PON, используя технологию WDM для разделения восходящих и нисходящих сигналов. Длины волн, используемые различными сигналами в обоих направлениях, показаны на рис. 5.5.

Выбор длин волн в распределении спектра обусловлен возможностями использования более дешевых лазеров для ONU/ONT. Лазеры, работающие в диапазонах длин волн 1270 нм и 1310 нм, дешевле лазеров, работающих в диапазоне 1500-1600 нм по причине разных технологий производства и относительных объемов продаж на мировом рынке.

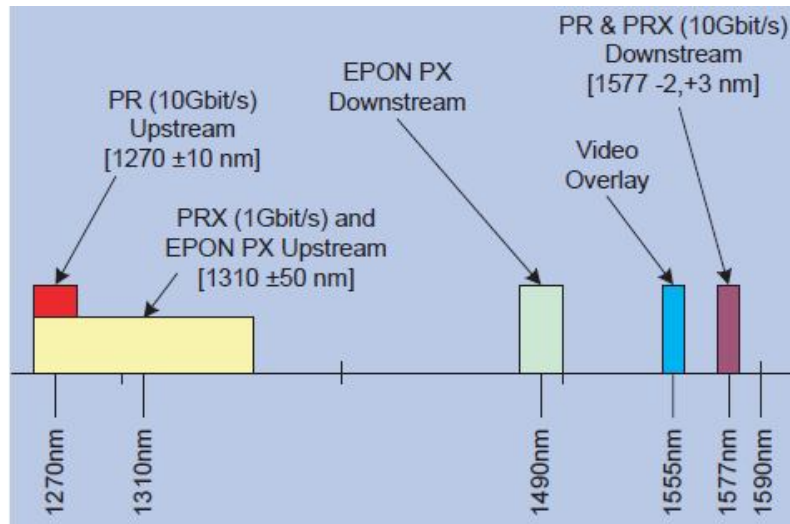


Рис. 5.5. Распределение спектра для сетей стандарта 10 Гбит/с EPON (10G-EPON)

Преимущества, позволяющими сетям 10G-EPON работать поверх той же ODN, что и 1G-EPON, являются:

- использование пользователями желаемых типов ONU/ONT;
- возможность перехода от GEAPON к 10 GEAPON путем обновления/замены только OLT. Затем при необходимости возможна замена ONU/ONT;
- бесперебойное обеспечение предоставляемых услуг в период миграции.

Рис. 5.6 иллюстрирует пример сети, в которой OLT поддерживает различные типы ONU/ONT (GEAPON ONU, 10G EPON ONU). Важно отметить, что WDM используется для разделения потоков 1 Гбит/с и 10 Гбит/с в нисходящем направлении, тогда как для восходящего направления – используется комбинация WDM и TDM.

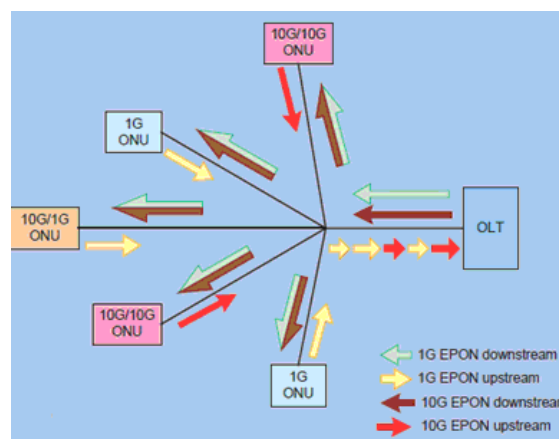


Рис. 5.6. Пример использования 1G-EPON и 10G-EPON в одной сети

OLT одновременно принимает сигналы в восходящем направлении от ONU/ONT, работающих на скоростях 1 Гбит/с и 10 Гбит/с. Принимаемые

потоки могут быть разделены как в оптической, так и во временной области. К сожалению, так как оба сигнала разделены во времени в одной и той же полосе длин волн, то невозможно использовать фильтр, чтобы изолировать их друг от друга в оптической области. Разделение сигналов в оптической области включает использование оптического разделителя (сплиттера) с коэффициентом разделения 1:2. Каждый из двух выходов этого сплиттера ведет к отдельному фотоприемнику, следующему за приемником с фильтром, оптимизированным для данной скорости, чтобы максимизировать чувствительность. Недостатком данного подхода являются около 3 дБ дополнительных оптических потерь, внесенных сплиттером 1:2. Если данные потери недопустимы, на стороне приемника должен быть установлен оптический усилитель с низким коэффициентом усиления. Разделение сигналов в электрической области позволяет использовать один фотоприемник и не вносит дополнительных оптических потерь сигнала. Существуют различные подходы к восстановлению сигналов 1 Гбит/с и 10 Гбит/с в электрической области с компромиссом между производительностью и сложностью.

Протокол 10G-EPON использует принцип TDMA, когда OLT рассылает всем ONU/ONT полезную информацию и синхронизирующие последовательности в нисходящем направлении. Каждый ONU/ONT выделяют свой нисходящий поток, основываясь на адресном поле информационного пакета. В восходящем направлении OLT назначает каждому ONU/ONT свой временной интервал (тайм слот), в котором передается восходящий поток данного конкретного ONU/ONT. Между импульсными передачами в восходящем направлении от разных ONU/ONT требуется полоса расфилтровки (guard interval), чтобы потоки от различных ONU/ONT не перекрывали друг друга на приемнике OLT. Важно отметить, что ONU/ONT должны выключать свои лазеры, когда они не передают информацию, чтобы предотвратить интерференцию спонтанной эмиссии шумов близлежащих ONU/ONT с передаваемой информацией от ONU/ONT, находящихся далеко от OLT. Для минимизации времени расфилтровки OLT использует протокол, определяющий временную задержку прохождения сигнала в восходящем и нисходящем направлениях между самим собой и каждым ONU/ONT в отдельности, и принимает это во внимание, назначая тому или иному ONU/ONT время передачи в восходящем направлении.

Комбинация CWDM и TDM позволяет системам 1G-EPON и 10G-EPON сосуществовать вместе.

6. АКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СЕТЕЙ PON. ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ АКТИВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СЕТЕЙ PON

6.1. Цели внедрения и основные преимущества технологии PON с точки зрения оператора связи.

Основной целью внедрения технологии PON является повышение доходов оператора связи за счет привлечения абонентов, заинтересованных в получении современных телекоммуникационных услуг, путем построения качественно новой широкополосной сети доступа.

Данная сеть должна обеспечить передачу для всего комплекса предоставляемых услуг – телефонии (VoIP), широкополосного доступа к сети передачи данных, IPTV, КТВ (кабельного телевидения). В тоже время данная сеть должна иметь наиболее экономичную, с точки зрения объема линейных сооружений оптоволоконную инфраструктуру.

Преимущества технологии PON:

- скорость доступа за счет оптического кабеля в квартиру против медного у альтернативных операторов;
- надежность. Отсутствие промежуточного активного оборудования, требующего обслуживания и дополнительного электропитания;
- экономия оптических волокон (до 64/128 абонентов на одно волокно), что дает экономию при прокладке и/или экономию при аренде оптических волокон;
- упрощение подключения новых абонентов и поиска неисправностей в случае аварии. Подключение, отключение или выход из строя одного или нескольких абонентских узлов не сказывается на работе всей сети⁴;
- экономия на монтажных работах (значительно уменьшается количество сварок, уменьшаются размеры и стоимость кроссов, муфт, кабеля);
- масштабируемость и гибкость: древовидная структура PON дает возможность подключать новых абонентов самым экономичным способом;
- возможность резервирования оптического волокна и переключения в автоматическом (при условии поддержки стационарным оптическим оборудованием OLT) или ручном режиме (при аварии оператор вручную переключает на резервное волокно) до полного устранения неисправности;

⁴ Кроме случаев неполадки и перехода приемопередатчика ONU/ONT в режим непрерывного излучения OCW (Optical Continuous Wave)

- возможность передачи аналогового телевизионного RF (Radio Frequency) сигнала в том же оптическом волокне на длине волны 1550 нм;
- широкий набор интерфейсов у абонентских узлов ONU/ONT.

6.2. Принцип действия, структура, основные характеристики оптического линейного терминала (OLT)

На оптических сетях доступа в России применяется оборудование PON нескольких компаний: Huawei Technologies (Китай), ZTE (Китай), «Элтекс» (Россия), ECI Telecom (Израиль), ZyXEL Communications (Тайвань) и др. Обычно в ассортименте компании встречается несколько моделей станционного оборудования различающихся по емкости портов. Несмотря на большое разнообразие, можно обобщить характеристики станционного оборудования по нескольким описанным ниже критериям.

Конструктивные характеристики

Наибольшее распространение получили конструкции OLT, предназначенные для установки в 19" шкаф/стойку. Наиболее компактные модели занимают высоту 1U и выполнены в виде единого устройства с интерфейсными разъемами на передней панели. Более крупные устройства высотой от 3 до 20U выполнены в виде шасси, в который устанавливаются платы специального назначения, например, платы управления и коммутации, интерфейсные платы, платы питания, сигнализации, охлаждения и др. На рис. 6.1 приведен внешний вид некоторых OLT.

Функциональные характеристики

Оборудование OLT обычно является платформой мультисервисного доступа и поддерживает различные режимы доступа в зависимости от требуемых приложений и условий организации сети. Обычно OLT осуществляет коммутацию трафика и соединение с транспортной сетью, предоставляя абонентам доступ к многочисленным услугам, основными из которых являются:

- голосовые услуги (в т.ч. передача факса и услуги модема);
- HDTV;
- VoIP-телефония;
- высокоскоростной доступ в интернет;
- IPTV;
- видео по запросу (VoD);
- видеоконференции.

При модульной конструкции возможные конфигурации оборудования позволяют предоставлять абонентам практически все виды современных услуг, поддерживая большинство современных технологий доступа и

сетевых протоколов. Наиболее популярные модели OLT имеют следующие функциональные характеристики:

- функции маршрутизации на уровнях L2 и L3;
- агрегирование каналов;
- поддержка технологий Ethernet, xDSL, TDM;
- контроль оптической мощности и измерение расстояния между OLT и ONU/ONT;
- динамическое распределение полосы пропускания.

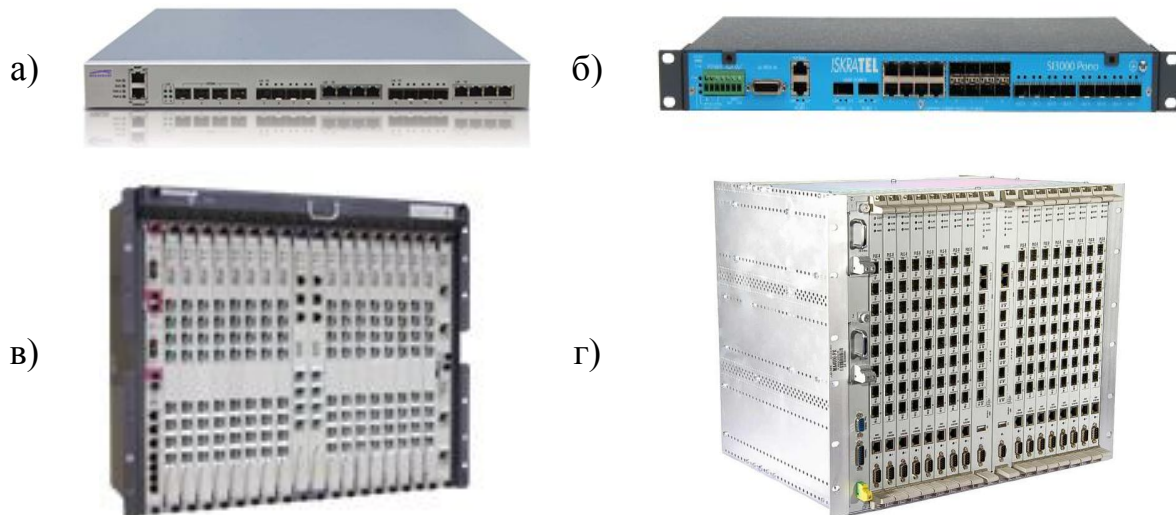


Рис. 6.1. Внешний вид оборудования OLT:
а) BW-5004-OLT (Broadware Networks);
б) SI3000 Pono (Искрател);
в) SmartAX 5680T (Huawei Technologies);
г) MA-4000PX (Элтекс)

Сетевые интерфейсы

Количество и тип портов зависят от назначения оборудования и его пропускной способности. Интерфейсы Uplink (от OLT к сети высшего уровня) могут быть представлены электрическими или оптическими портами TDM или Ethernet. Наибольшее распространение получили комбинированные интерфейсы E1, STM-1, 10/100/1000 Base-X или 10GBase-X.

Интерфейсы Downlink (от OLT к абонентам) могут быть представлены сочетанием портов xDSL (ADSL, ADSL2+, VDSL2, G.SHDSL.bis), POTS, E1, ISDN, P2PFE, GEPON и GPON. Интерфейсы GPON служат для подключения оптической распределительной сети (PON) к OLT. К каждому интерфейсу можно подключить до 32/64/128 абонентских оптических терминалов по одному волокну.

Физически интерфейсы могут быть выполнены в виде разъемов для подключения симметричного кабеля или оптического волокна или слотов для установки приемо-передающих модулей. Наибольшее распространение получили SFP модули (Small Form-factor Pluggable). Типичный SFP модуль GPON имеет следующие характеристики:

- тип разъема – SC/UPC;
- чувствительность приемника – от -30 до -6 дБм;
- среда передачи – оптоволоконный кабель с ОВ SMF 9/125, G.652;
- бюджет оптической мощности (up/downstream) – $30,5 / 30$ дБ;
- минимальное затухание up/downstream – $11 / 15$ дБ;
- ширина спектра опт. излучения up/downstream $\Delta\lambda -1 / 1$ нм;
- длина волны соединения up/downstream – $1310 / 1490$ нм;
- скорость соединения up/downstream – $1,25 / 2,5$ Гбит/с;
- коэффициент разветвления – от $1:2$ до $1 : 64$;
- максимальная дальность действия – до 20 км.

Управление оборудованием

Управление оборудованием обычно осуществляется с персонального компьютера через локальный порт, например консольный порт RS-232. Некоторые модели OLT поддерживают удаленное управление через интерфейс SNMP (Simple Network Management Protocol - простой протокол сетевого управления) или сервисную программу, разработанную изготовителем оборудования.

Электропитание

Электропитание OLT обычно осуществляется от источника постоянного тока с напряжением $48; 60$ или 72 В. Некоторые модели могут подключаться к сети переменного тока 220 В или комплектоваться при поставке встраиваемым блоком питания (интерфейсной платой) на требуемое напряжение питания.

6.3. Особенности разработки блока коммутатора пассивных оптических сетей (OLT)

Блок коммутатора OLT предназначен для организации сетей широкополосного доступа на основе ВОЛС с использованием стандартов ITU-T G.984 (GPON), IEEE 802.3ah (1G-EPON), IEEE 802.3av (10G EPON), ITU-T G.987 (XG-PON).

Разработанная структура OLT представляет собой шасси со сменными модулями, разделенными на три типа: модуль коммутатора Ethernet, интерфейсный модуль PON с поддержкой одного стандарта на каждый тип модуля, модуль ввода электропитания.

Основные этапы разработки OLT:

- разработка аппаратной платформы. Этот этап включает в себя подбор и разводку печатных плат, выбор схемотехнических элементов, а также написание низкоуровневого ПО (программного обеспечения);
- установка и конфигурирование операционной системы (ОС Linux) для процессорного блока управления (Management);
- разработка ПО управляющего ядра для операционной системы (ОС Linux) процессорного блока управления (Management);
- разработка ПО для блока сетевых интерфейсов (Network Uplink) коммутационной карты;
- разработка ПО для процессоров блока оптических xPON интерфейсов (GPON, 1G-EPON, 10G-EPON, XG-PON Downlink) линейных карт;
- различные виды тестирования

Результатом разработки является программно-аппаратный комплекс, соответствующий заявленным в постановке на разработку требованиям к структуре и функционированию и отвечающий заявляемым целям и задачам.

Коммутатор OLT обычно выполнен в корпусе для установки в телекоммуникационный шкаф шириной 19” и 23”. Блок OLT представляет собой шасси со сменными модулями. Сменные модули на основе стандарта ATCA разделяются на следующие типы:

- модуль коммутации Ethernet и управления (в дальнейшем модуль коммутатора);
- интерфейсный модуль пассивных оптических линий связи (в дальнейшем интерфейсный модуль, поддержка одного стандарта на каждый тип модуля)

Дополнительные сменные модули:

- модуль ввода электропитания PEM (Power Electric Module);
- модуль вентиляторов охлаждения с возможностью управления и контроля скорости вращения.

Соединение каналов данных и управления интерфейсных модулей и модулей коммутатора осуществляется на кросс-плате (объединительная плата backplane). Кросс-плата обычно рассчитана на установку 8/14/16-ти интерфейсных модулей и 2-х модулей коммутатора (основной + резервный). Коммутация шин электропитания, сигнальной «земли», корпусной «земли», последовательных каналов управления и сигналов температурных датчиков осуществляется на плате управления электропитанием РСМ (Power Control Module). Плата предусматривает установку двух съемных

модулей ввода электропитания и одного модуля вентиляторов охлаждения. Подключения между модулями и платами блока OLT отображены на структурной схеме (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Структурная схема разрабатываемого блока коммутатора OLT PON

Модуль коммутатора OLT

Локальное управление коммутатора осуществляется встроенным или внешним процессором CPU. Поэтому рассмотрим структуру модуля коммутатора детальнее.

Коммутатор поддерживает функционал уровня доступа (VLAN, агрегирование каналов, предоставление услуг Triple Play).

Плата коммутации – основной элемент платформы, который выполняет функции общего управления и диагностики модулей периферии, коммутации, агрегации трафика (рис. 6.3).

Установка нескольких модулей позволяет построить высоконадежную систему за счет резервирования коммутаторов и увеличить пропускную способность системы за счет распределения потоков данных между модулями путем. Структуру модуля коммутации OLT можно условно разделить на несколько блоков:

- процессор управления;
- блок коммутатора 10G;
- системный контроллер управления



Рис. 6.3. Пример платы модуля коммутатора (ООО «Предприятие «Элтекс»)

Модуль управления OLT

Выполнен на процессоре и обеспечивает поддержку управления через последовательную консоль со скоростью 115200 бит/с. Поддерживает Ethernet, доступ и конфигурацию по сетевым протоколам (telnet, протокол безопасной оболочки SSH, простой протокол управления сетью SNMP для статистики, мониторинга и управления ONT). Состав модуля управления:

- центральный процессор (CPU);
- соединение с модулем центрального коммутатора;
- различные порты

Модуль линейных интерфейсов OLT

Модуль линейных интерфейсов OLT типа «Шасси» предназначен для организации широкополосного доступа в сеть передачи данных (рис. 6.4). При наличии функции RSSI (Received Signal Strength Indicator) позволяет определить значения мощности принимаемых оптических сигналов от каждого ONU/ONT и измерить параметры состояния оптической линии.



Рис. 6.4 Пример платы модуля линейных интерфейсов (ООО «Предприятие «Элтекс»)

Для OLT типоразмера 1U (44,5 мм) модуль линейных интерфейсов может быть выполнен на базе микросхем (System-on-Chip – SoC) компаний Broadcom, Qualcomm, Marvell, PMC-Sierra, Cortina Systems и т.д. Обеспечивает протоколы OAM (EPON), OMCI (GPON), служащие для управления абонентскими устройствами ONU/ONT.

Структуру модуля линейных интерфейсов можно условно разделить на несколько блоков:

- процессор управления модуля линейных интерфейсов;
- блок GPON/1G-EPON/10G-EPON/XG-PON (в зависимости от применяемой технологии);
- системный контроллер управления.

6.4. Принцип действия, структура, основные характеристики оптического сетевого терминала (ONT)

Абонентские устройства на сетях PON предназначены для организации соединения по оптическому каналу со стационарным устройством OLT и обеспечения широкополосного доступа к услугам сети (доступ в Интернет, VoIP, HD-видео и др).

В зависимости от числа подключаемых пользователей абонентские устройства сетей PON можно разделить на:

- многопользовательские, предназначенные для подключения пользователей многоквартирного здания или офиса (ONU);
- однопользовательские, предназначенные для подключения абонентов одной квартиры или частного дома (ONT).

Терминалы обычно размещаются внутри помещений абонентов на горизонтальной поверхности или монтируются на стену. Однако имеются модели для размещения вне помещений, эти модели снабжаются дополнительным защитным кожухом.

Терминалы различаются по функциональным возможностям, типу и количеству имеющихся у них сетевых интерфейсов. Простейшие модели ONT располагают только одним интерфейсом GPON (для подключения к сети оператора) и одним интерфейсом GE. Более сложные модели могут располагать комбинацией из следующих интерфейсов:

- 10/100 Base-T Fast Ethernet (обычно от 1 до 4);
- Gigabit Ethernet (обычно от 1 до 4);
- интерфейс USB (для подключения накопителя);
- модуль WI-FI;
- CATV (BЧ разъем для подключения телевизора);
- FXS (разъем для подключения аналоговых телефонных линий (от 1 до 4)).

Внешний вид терминалов приведен на рис. 6.5.



Рис. 6.5. Внешний вид оборудования ONT:
а) EchoLife HG8242 (Huawei);
б) NTE-RG-1402GC-W (Элтекс)

Абонентские терминалы обычно выполняют функции маршрутизатора, что позволяет подключать оборудование локальной сети к сети широкополосного доступа. При наличии модуля Wi-Fi терминал может служить беспроводной точкой доступа. Помимо передачи данных и собственно голосового соединения, пользователям могут быть доступны такие дополнительные услуги, как постановка на ожидание, идентификация номера вызывающего абонента и трехсторонняя конференцсвязь, передача модемного трафика по телефонному каналу поверх IP и др. Терминалы могут оснащаться батареей для обеспечения связи при пропадании электропитания.

7. ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ СЕТЕЙ PON.

Оптическое волокно продолжает оставаться одной из самых оптимальных и востребованных сред для передачи данных, сигналов и информации на большие расстояния без ограничения по полосе пропускания и скорости передачи. Для построения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) требуется использование специализированного активного и пассивного оборудования, а также применение специальных инструментов и приборов. Разветвитель (optical splitter) – небольшое, но необходимое устройство, используемое при строительстве сетей связи с использованием оптического волокна.

В оборудовании для ВОСП, в измерительной технике для метрологического обеспечения, в оптических сетях доступа широко используются пассивные оптические дискретные элементы и устройства.

Компонентом системы называется изделие, являющееся частью этой системы как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации. Пассивным компонентом ВОСП называется компонент, не воздействующий на оптическое излучение при выполнении определенных функций.

Пассивные участки оптических сетей доступа – полностью основаны на использовании таких элементов и устройств. Под пассивными дискретными оптическими устройствами или элементами следует понимать такие элементы или устройства, коэффициент передачи которых меньше единицы и они для выполнения своих функций не требуют подведения электрического питания. К пассивным дискретным оптическим устройствам относятся:

- оптические ответвители и разветвители;
- оптические переключатели и коммутаторы;
- оптические изоляторы и циркуляторы;
- поляризаторы;
- коллиматоры;
- оптические мультиплексоры/демультиплексоры;
- оптические модуляторы;
- оптические соединители, адаптеры и аттенюаторы и т. д.

Но наиболее важными пассивными компонентами ВОЛП, о которых пойдет речь дальше, являются оптические соединители и разветвители, которые служат для объединения или разъединения оптических сигналов.

Волоконные разветвители, называемые также направленными разветвителями, играют важную роль в волноводной технологии. Они используются в самых разных оптоволоконных устройствах, требующих расщепления оптического поля на две когерентные, но физически разделенные части (и наоборот). Большинство применений волоконных разветвителей пре-

дусматривает использование только их линейных характеристик. Однако нелинейные эффекты этих устройств, изучавшиеся с 1982 г., также могут применяться в практических целях, в частности для осуществления полного оптического переключения.

Различают нечувствительные (неселективные) и чувствительные (селективные) разветвители. Первые используются для разветвления оптической мощности при наличии большого числа оконечных устройств в линии связи. Вторые применяются для объединения или разъединения сигналов с различными оптическими несущими и называются соответственно мультиплексорами и демультиплексорами.

Неселективные разветвители подразделяют в свою очередь на два основных типа:

- *звездообразные*, имеющие одинаковое количество входных и выходных полюсов ($M=N$);
- *древовидные*, распределяющие оптическое излучение на N направлений или выполняющие обратную функцию.

Здесь и далее рассматриваются различные типы разветвителей и делителей, рассмотрены методы их изготовления, классификации по основным и дополнительным параметрам, указаны конкретные характеристики тех или иных пассивных компонентов.

7.1. Пассивный оптический сплиттер. PLC и FBT. Технологии изготовления

Волоконно-оптические ответвители, в особенности разветвители (сплиттеры), наряду с оптическими кабелями, являются основными элементами пассивных оптических сетей, получающих все большее распространение. Эти элементы – одни из главных в древовидной топологии сетей доступа. Как понятно из названия, оптические ответвители выполняют функцию ответвления части энергии светового потока с заданным коэффициентом ответвления. Ответвители, в основном, находят применение в системах и устройствах контроля параметров и управления оборудованием и ВОСП, а также в измерительных приборах для ВОСП, в особенности – в оптических рефлектометрах (OTDR). В волоконной технике (а оптическое волокно – это волновод оптического диапазона) ответвители являются направленными, так как ответвление происходит только при распространении оптического излучения в прямом направлении. В принципе, оптические разветвители подразделяются на направленные и ненаправленные. В направленных ОР, которые получили наиболее широкое распространение, коэффициенты передачи между оптическими полюсами зависят от направления распространения оптического излучения. Направленные ОР позволяют, например, организовать двунаправленную (дуплексную) систему передачи по одному ОВ. При распространении излу-

ния в обратном направлении ответвления не происходит, хотя при этом в точке ответвления часть энергии теряется.

В настоящее время существует два типа направленных ответвителей: ответвители X-типа и Y-типа. Широкое применение получили ответвители X-типа. На рис. 7.1 а представлена схема такого направленного ответвителя.

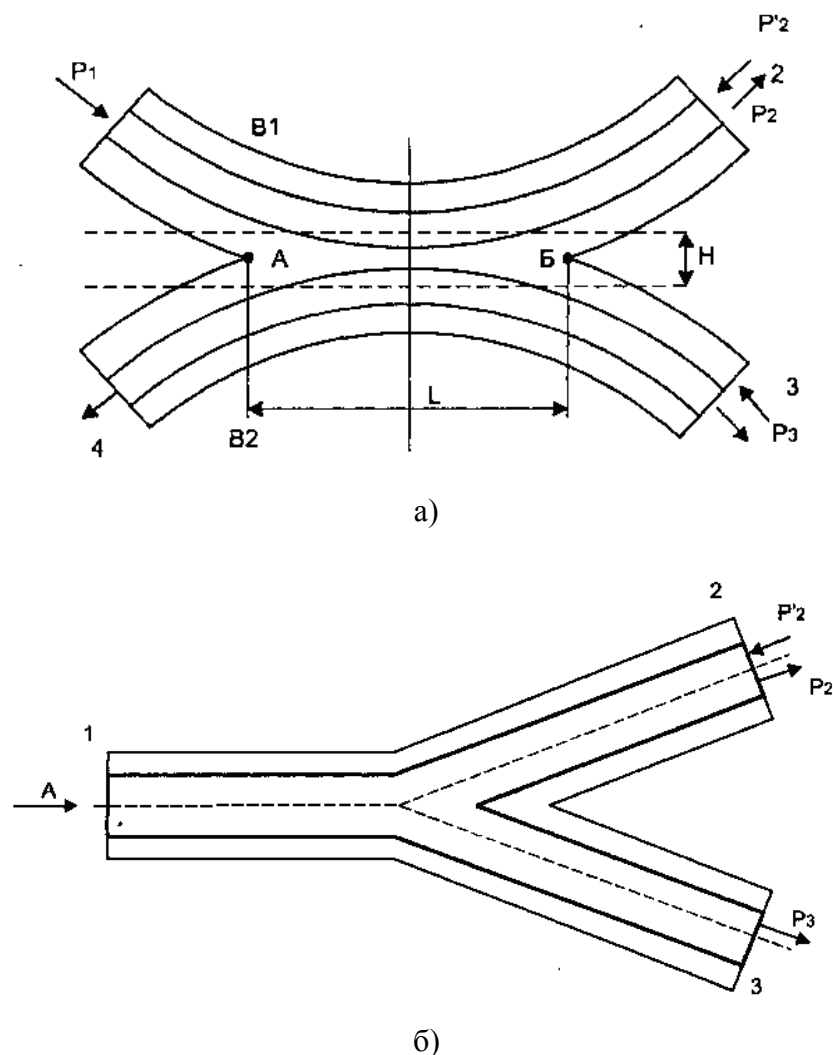


Рис. 7.1. Направленный ответвитель:
а) X-типа;
б) Y-типа

Ответвитель X-типа изготавливается из двух отрезков оптических волокон. На некоторой длине L у каждого из волокон шлифуется (или удаляется травлением) часть рабочей оболочки, после чего оба волокна сплавляются с помощью сварочного аппарата. В результате такой технологической операции сердечники волокон располагаются параллельно на длине L . В зависимости от расстояния H между центрами сердечников OB и длины L между волноводами происходит взаимодействие, выражающее-

ся в том, что на определенном расстоянии от точки А в направлении точки Б энергия мод волновода В1 переходит в волновод В2; при дальнейшем распространении она возвращается в волновод В1. На некоторой промежуточной длине L мощность излучения распределяется поровну в обоих каналах. Величина L зависит от зазора H и от длины волны излучения. Наиболее часто ответвитель Х-типа выполняется для режима деления входной мощности на две равные части, хотя для устройств контроля изготавливают и такие Х-ответвители, у которых коэффициент ответвления может составлять менее 10%.

Теперь обратимся ко второму типу ответвителей – ответвитель типа Y. Схема его устройства представлена на рис. 7.1 б. Такие ответвители в подавляющем большинстве случаев используются в качестве делителей мощности на две части (которые могут быть и неравными), поэтому он чаще называется разветвителем или сплиттером. Этот тип разветвителя является базовым для изготовления многоканальных матричных разветвителей и различных интерферометров.

Оба типа ответвителей характеризуются следующими количественными параметрами:

- коэффициент передачи (дБ):

$$k_{\text{передачи}1-2} = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (7.1)$$

$$k_{\text{передачи}1-3} = 10 \lg \left(\frac{P_3}{P_1} \right) \quad (7.2)$$

- коэффициент ответвления/деления (дБ):

$$k_{\text{отв}} = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_3} \right) \quad (7.3)$$

- коэффициент развязки (переходное затухание) (дБ):

$$k_{\text{развязки}} = 10 \lg \left(\frac{P_2'}{P_3'} \right) \quad (7.4)$$

- коэффициент направленности (дБ):

$$a_n = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_4} \right) \quad (7.5)$$

Как уже было сказано выше, наиболее часто волоконно-оптические разветвители используются для деления мощности оптического излучения пополам, хотя для устройств контроля и измерения изготавливаются такие разветвители, у которых ответвляемая мощность не превышает 10%. Разветвители Y-типа широко используются для объединения оптической

мощности в одно ОВ, а также они являются базовыми для изготовления древовидных разветвителей, осуществляющих деление (объединение) мощности на N волокон.

Коэффициент направленности определяет ту часть энергии, которая проникает, например, в плечо 4 при вводе излучения в плечо 3 или, наоборот, в плечо 3 при вводе энергии в плечо 4.

Современные ответвители и разветвители X и Y-типов имеют вносимые потери $a_{ins} \leq 0,8$ дБ, коэффициент направленности $a_H > 50$ дБ. Кроме обозначенных коэффициентов, разветвители могут характеризоваться следующими показателями с точки зрения потерь:

- *потери на разветвлении*, определяющие распределение мощности между выходами при условии равенства мощности на всех входах $\alpha_d = -10 \lg(N)$ дБ, где N – число выходов;
- *потери на обратном рассеянии*, определяющие уровень мощности обратного рассеяния на одном из входов разветвителя, дБ;
- *переходное затухание*, представляющее собой отношение оптической мощности на одном из выходов разветвителя к общей выходной мощности.

Также необходимо учесть и тот факт, что в зависимости от распределения мощности сплиттеры бывают:

- *равномерные* (на выходе данных устройств мощность сигнала распределяется на равные части; если происходит деление на два канала, величина мощности сигнала на входе будет вдвое больше, чем двух сигналов при выходе);
- *неравномерные* (при этом показатели мощности сигнала при выходе находятся в определенных пропорциях друг к другу (например, 20/30/30/20); это происходит за счет большего или меньшего проникновения одного волокна в другое).

От этой классификации делителя также будут зависеть количественные показатели, приведенные выше.

Еще одной важной характеристикой сплиттеров является центральная длина волны и полоса пропускания. Показатели всех разветвителей меняются в зависимости от длины волны. Спецификация разветвителей обычно распространяется на одно окно прозрачности или, в некоторых случаях, на несколько окон. Центральная длина волны является лишь номинальной рабочей длиной волны разветвителя, тогда как полоса частот является диапазоном длин волн, в рамках которого эта спецификация гарантируется.

Критерий выбора полосы пропускания, рекомендуемый компанией Telcordia, состоит в следующем:

- для не-WDM приложений, работающих в диапазонах 1310/1550 нм и с WDM-элементами ветвления, для всех цифровых приложений должны выполняться следующие требования по ширине обоих ра-

бочих полос в длинноволновой области: 1260 - 1360нм и 1480 - 1580нм;

- для приложений WDM с длинными секциями рекомендуемые полосы следующие: 1280 - 1335нм и 1525 - 1575нм;
- для DWDM рекомендуемые полосы следующие: 1285 - 1325нм и 1530 - 1566нм;
- для гибридных систем, использующих амплитудную модуляцию с частично подавленной боковой полосой (АМ-ЧПБП), рекомендуемые полосы следующие: 1290 - 1330нм и 1530 - 1570нм.

Следует заметить, что разработчики оптоволоконных элементов рекламируют в настоящее время различные устройства, частотный диапазон которых простирается много дальше 1600 нм.

Звездообразные волоконно-оптические ответвители и разветвители. Основные характеристики

Отличительная особенность звездообразных разветвителей – они имеют более 4 портов. Существуют два типа таких разветвителей: звездообразный разветвитель передающего типа и звездообразный разветвитель отражающего типа. Звездообразный разветвитель передающего типа представлен на рис. 7.2.



Рис. 7.2. Звездообразный разветвитель передающего типа

Световой поток, поступающий на один из входных портов звездообразного разветвителя передающего типа, разветвляется на все выходные порты равномерно. Например, на рис. 7.2, свет, поступающий на входной порт E, разветвляется на выходные порты G, H, I, J, K и L.

Существуют направленные ответвители с топологией дерева и ветви с коэффициентом разветвления $1 \times N$ и $2 \times N$. Направленность достигается с одним основным портом ввода-вывода и двумя ответвленными портами ввода-вывода. Основное волокно может передавать оптическую мощность в двух направлениях. Ответвляемые порты при этом являются однонаправленными – оптическая мощность направляется в них к основному или от основного волокна.

Технологии изготовления оптических разветвителей. FBT и PLC сплиттеры

Существует две технологии изготовления оптических разветвителей: **сварные** – FBT (Fused Biconical Taper) и **планарные** – PLC (Planar Lightwave Circuit). Соответственно, по своей конструкции разветвители разделяют на две основные группы:

- **биконические**, в которых излучение передается через боковую поверхность волоконных световодов;
- **торцевые**, в которых излучение передается через торец оптических волокон.

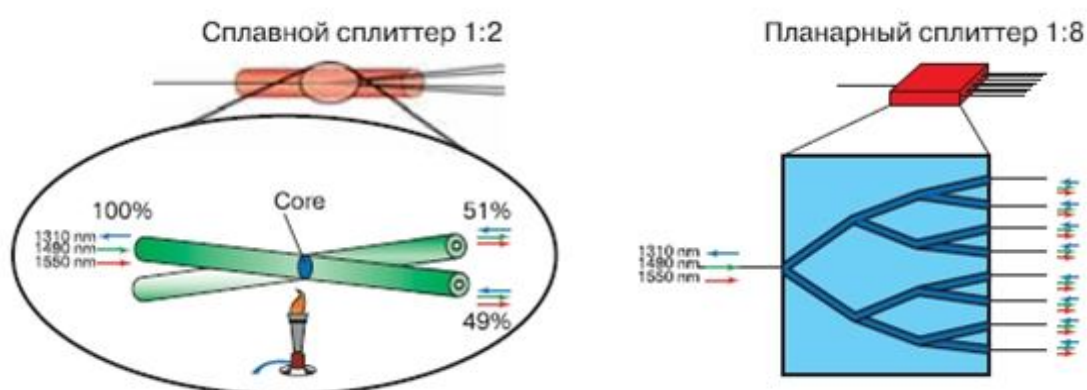


Рис. 7.3. Основные технологии изготовления сплиттеров

Сварные разветвители выполнены по технологии FBT: два волокна с удаленными внешними оболочками сплавляют в элемент с двумя входами и двумя выходами (2:2), после чего один вход закрывают безотражательным методом, формируя разветвители 1:2. Можно обеспечить разделение мощности и в других пропорциях, например 20:80 (20% мощности сигнала идет в одно плечо, 80% – в другое). Сварные разветвители обычно имеют от одного до трех окон прозрачности (1310 нм, 1490 нм или 1550 нм). Окно прозрачности – это диапазон длин волн оптического излучения, в котором имеет место меньшее, по сравнению с другими диапазонами, затухание излучения в волокне. Такие разветвители чаще всего используются для построения сетей кабельного телевидения. Первые технологически удачные и экономически приемлемые конструкции начали изготавливаться в 1990-х годах методом сплавления отдельных оптических волокон.

Технология создания сварных разветвителей состоит из следующих этапов:

- снятие защитного буфера, очистка и шлифовка оптических волокон;
- обеспечение контакта боковых поверхностей световодов и фиксация оптических волокон в специальном устройстве, который будет

вытягивать волокна;

- нагрев и одновременное вытягивание световодов с подачей оптической мощности на вход сплиттера и контролем оптической мощности на выходах.

При сплавлении двух волокон образуется X-образный оптический разветвитель 2×2 , из которого можно сделать Y-образный разветвитель 1×2 , удалив один из световодов.

Ключевые параметрические особенности:

- традиционно сварные сплиттера состоят из волокон, что имеют от одного до трех окон прозрачности (1310 нм, 1490 нм или 1550 нм);
- коэффициент разветвления больше, чем 1:4, реализуется каскадным размещением сплиттеров 1×2 , 1×3 или 1×4 , с максимальным числом разветвления до 32 (конструкции с двумя входными волокнами также возможны);
- каждый последующий каскад разветвления приводит к существенным вносимым потерям (Insertion Loss – IL) и снижению равномерности распределения.

Планарные разветвители изготавливаются в несколько этапов. Первый из них заключается в нанесении на подложку отражающего слоя-оболочки (кремниевая подложка). На данный слой наносится материал волновода, на котором в последствии формируется маска для травления. Результатом процесса травления является система волноводов, являющаяся, по сути, оптическим делителем. Система планарных волноводов покрывается вторым отражающим слоем-оболочкой. Необходимое количество разветвлений PLC-сплиттера достигается сочетанием делителей 1×2 . Планарная технология позволяет изготавливать компактные и надежные разветвители с числом выходных волокон до 64. Планарные разветвители обладают более стабильными и точными характеристиками на выходах, работают в широкополосном диапазоне волн 1260–1650 нм., имеют меньшее затухание на порт, меньше подвержены механическим воздействиям и способны работать в более широком диапазоне температур (от -45°C до $+85^\circ\text{C}$), чем сплавные (от -40°C до $+75^\circ\text{C}$). Планарные разветвители используют для спектрального уплотнения каналов. Также их использование предпочтительно при построении пассивных оптических сетей, так как кроме выше перечисленных преимуществ, они позволяют заложить на будущее возможность использовать дополнительные сервисы либо увеличить пропускную способность каналов путем уплотнения.

В последние несколько лет активно развивается технология создания планарных разветвителей. Такие устройства выполняются методами интегральной оптики.

Ключевые параметрические особенности:

- равномерное, симметрическое деление оптической мощности. Возможные соотношения разделения от 1x4 до 1x64 и больше (конструкции с двумя входными волокнами также возможны);
- компактность устройства, по сравнению с FBT, при больших коэффициентах деления (не каскадные), что немаловажно при монтаже;
- стабильность и точность деления, низкий уровень вносимых потерь при более высоких длинах волн по сравнению с FBT (во всех окнах прозрачности);
- широкий оптический спектр, применимый в системах спектрального уплотнения WDM.

Сравнительные характеристики стойкости к воздействию внешних факторов приведены в таблице ниже (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Сравнительные характеристики стойкости к воздействию внешних факторов

Наименование внешнего фактора	Наименование характеристики внешнего фактора, единица измерения	Значение характеристики внешнего фактора для оптических разветвителей, и объединителей изготовленных по технологии	
		PLC	FBT
Синусоидальная вибрация	Диапазон частот, Гц	1...80	1...2000
	Ускорение, g	2	10
Механический удар одиночного действия	Длительность, мс	2...10	15
	Ускорение, g	20	150
Температура окружающей среды	Предельное повышенное значение, С	80	85
	Предельное пониженное значение, С	-40	-60
Относительная влажность воздуха	Предельное значение, %	98 (при температуре 25 С)	100 (при температуре 35 С)
Атмосферное давление	Пониженное значение, кПа	84	0,67
	Повышенное значение, кПа	106	292

Далее более подробно рассмотрим концепцию изготовления сварных разветвителей. Исходным материалом имеем два отрезка оптического волокна, которые касаются друг друга. Путем помещения их в открытый огонь получаем сплавной разветвитель с биконическими полюсами.

Внутри каждого волокна существует длинная секция ответвлений, затем однородная секция длины Z , где они свариваются, а затем еще одна

секция ответвлений, с направленным обратно по отношению к первой, кросс-соединением двух отдельных волокон. Эти ответвления достаточно плавные, так что только незначительная часть энергии, падающая из любого порта, расположенного слева, отражается назад в любой из портов, расположенных справа. По этой причине указанные устройства часто называют направленными разветвителями.

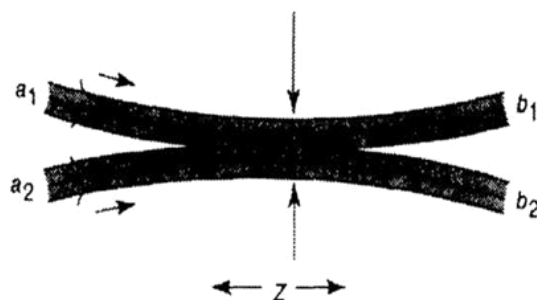


Рис. 7.4. Схематическое изображение сплавного биконического разветвителя

Используя эту технологию, можно сделать ряд разветвителей, основанных на том, что уровень мощности, перешедшей из одного волокна в другое, может быть изменен путем изменения следующих параметров:

- длины области связи (Z), через которую осуществляется взаимодействие двух полей; радиуса сердцевины (a) в области связи;
- разности радиусов сердцевины в области связи.

Созданные на базе этой концепции различные типы разветвителей будут описаны ниже.

Моды низкого порядка продолжают существовать в исходном волокне до тех пор, пока угол падения остается больше критического угла. На выходе оболочечные моды конвертируются обратно в моды сердцевины. При этом коэффициент разветвления определяется длиной разветвителя (в нашем случае – Z , см. рис. 7.4) и толщиной оболочки.

Типичный вариант разветвления мощности в этом случае может быть 50:50, когда одна половина мощности идет на один выходной порт, а другая – на другой. Этот тип разветвителя мощности является частью основного класса разветвителей, базирующихся на концепции сплавного разветвителя с биконическими отводами, описанного выше. Многие типы разветвителей (комбайнеры, Y-переходы, звездообразные разветвители, направленные разветвители и т.д.) могут быть сделаны на основе такого разветвителя, как разветвитель мощности, представленного на рис.7.5.



Рис. 7.5. Разветвитель на основе многомодового волокна

На рис. 7.6 показан разветвитель, который работает с одномодовым волокном, но является зависимым от используемой длины волны. Когда два разветвителя в варианте с биконическими отводами находятся в тесном контакте друг с другом, возникает резонансное явление. Световой поток волокна А захватывается сердечником волокна В. Уровень мощности, переданный в волокна В и А, зависит от длины области связи. Световой поток из волокна А может быть захвачен на 100%, т.е. полностью перейдет в волокно В на определенной длине, называемой длиной области связи, или на длине нечетно кратной ей. Длина области связи изменяется в зависимости от длины волны света в волокне. Величина коэффициента разветвления при этом может быть настроена путем выбора нужной длины области связи.



Рис. 7.6. Оптический разветвитель на основе одномодового волокна

Важным является следствие того факта, что длина области связи зависит от длины волны света в одномодовом разветвителе. Предположим, что мы передаем по волокну две длины волны: 1300 и 1550 нм. Требуемая длина области связи, для длины волны 1550 нм, больше, чем для длины волны 1300 нм. Это приводит к тому, что свет с длиной волны в 1300 нм полностью (100%) перейдет в сердцевину волокна В из А, а затем вернется из В сердцевину волокна А. Свет длины волны 1550 нм также полностью (100%) перейдет в сердцевину волокна В из А.

Тщательно выбирая длину области связи, можно добиться объединения или разделения двух длин волн (рис. 7.7).

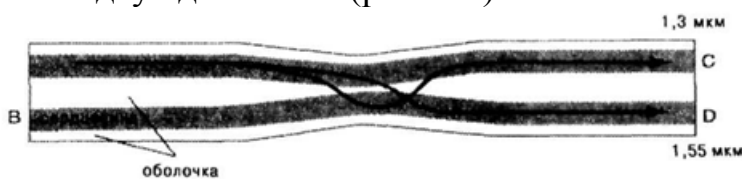


Рис. 7.7. Процесс разделения длин волн при помощи разветвителя на основе одномодового волокна

Если два таких разветвителя расположены последовательно (рис.7.8), и два рукава имеют разные оптические пути между местами сварки, то такая комбинация действует подобно интерферометру Маха-Цендера.

Мощность входного сигнала распределяется между выходными волноводами в зависимости от длины волны с определенной периодичностью. Если составной входной сигнал содержит оптические каналы двух различных длин волн, то при определенном подборе параметров эти каналы на выходе окажутся в разных выходных волокнах. Второе входное волокно не используется.



Рис. 7.8. Распределение входного сигнала между 2 выходами

Если на вход поступает составной сигнал, который содержит большое количество каналов на разных частотах (с одинаковыми расстояниями между ними), на выходе в каждом волокне будет по половине каналов с расстоянием между частотами в два раза больше. Используя последовательно несколько разветвителей, можно вывести каждый канал в отдельное волокно.

Массивы таких устройств, отдельные секции которых иногда заменены брэгговскими решетками, используются для выделения каналов определенной частоты из многоканальных систем WDM и DWDM или для добавления каналов в каком-либо узле оптической сети. Поскольку они являются полностью пассивными устройствами и имеют низкие потери, допустимо применение достаточно больших наборов таких устройств.

7.2. Основные производители разветвителей

В настоящее время оптические ответвители и разветвители производят множество фирм и компаний. Среди зарубежных производителей можно выделить такие компании как, Browave Corporation (Тайвань), Shanghai Grandway Telecom Tech. Co (КНР), AFW Technologies (Австралия), AMP (Швейцария), FOCI (Тайвань), Global Opticom (США) и т.д.

Интересным является факт того, что ответвители с вносимыми потерями 0,1 дБ выпускаются только двумя компаниями: Michael S Cohen (США) и Nanonics Imaging Ltd (Израиль). В России ответвители X-типа с такими параметрами производит НТО «ИРЭ-Полнос» (г. Фрязино Московской области). Ниже приведены параметры этих ответвителей:

- коэффициент ответвления %: 50/50; 30/70; 20/80; 10/90; 5/95; 1/99;
- рабочая длина волны, мкм: 0,83; 1,06; 1,3; 1,55;
- вносимые потери, дБ: <0,1 (класс А); <0,2 (класс В);
- неравномерность коэффициента ответвления, дБ: 0,1;
- обратное отражение, дБ: <-60;
- поляризационная чувствительность, дБ: 0,1.

Кроме данного производителя, на территории России производством сплиттеров занимаются компании: ООО «ОПТЕЛ», ООО «ФОПС», ГК FIBERTOOL, ЗАО «СТР», ЗАО ЦНИТИ «Техномаш-ВОС», АО «Центр ВОСПИ», АС «ПТ плюс», НПО «ПасКом», ООО «Проинтех».

К примеру, по ТУ6665-018-41085936-2006 изготавливаются некоторые отечественные разветвители и объединители.

7.3. Различные типы оптических делителей и разветвителей (в том числе по форм-фактору, по типу разъема)

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению конкретных характеристик делителей и разветвителей необходимо уяснить некоторые элементы классификации данных пассивных компонентов.

С точки зрения классификации *по форм-фактору*. Разветвители (сплиттеры) бывают трех типов исполнения:

- гильза;
- в коробочном исполнении;
- в кроссовом исполнении.

Далее, *по типу корпуса*, сплиттеры могут быть компактные металлические, пластиковые, стоечные. Все эти три типа представлены на рис. 7.9.



Рис. 7.9. Иллюстрация трех типов сплиттеров по форм-фактору

Кроме того, *по типу разъема* пассивные компоненты делятся на 5 типов: SC, FC, LC, ST, no-end.

В свою очередь далее, сплиттеры могут быть классифицированы и *по типу полировки разъема*: UPC, APC. Данные типы проиллюстрированы на рис. 7.10.



Рис. 7.10. Типы разъема сплиттеров

Также, по количеству ответвлений сплиттеры бывают самые разные: от 1:2 до 2:128. Все зависит от конкретных технических условий прокладываемой линии.

Применение оптических разветвителей

Оптические делители и ответвители используются не только для построения новых сетей, а применяются для мониторинга работы активного оборудования. Для целей мониторинга работы ВОЛС небольшая часть оптической мощности отводится из оптоволокна при помощи оптического сплиттера на порты контролирующего оборудования, которое позволяет отслеживать состояние и работоспособность ВОЛС и портов активных устройств, передающих сигналы. Принцип разделения оптического сигнала: если соединить два световода друг с другом боковыми поверхностями, то через контактную площадку будет происходить переход части оптической мощности из одного световода в другой.

Наиболее широкое применение оптические делители получили в трех отраслевых нишах:

- сети передачи кабельного телевидения (CATV);
- пассивные оптические сети (PON);
- компоненты сложных оптических устройств.

В сетях передачи кабельного телевидения, сети CATV, в большинстве случаев используют делители сварного типа, так как обеспечивают неравномерное деление, позволяя создавать трассы с топологией «точка-многоточие». В данном случае делители используются в качестве ADM (add drop module) – меньшая часть оптического сигнала выделяется, а большая передается далее по трассе.

В некоторых случаях, использование планарных делителей в сетях CATV является наиболее предпочтительным, но при соблюдении главного условия – возможности равномерного деления сигнала на все выходы.

В сетях PON коммутация на участке между оптическим линейным терминалом (OLT), расположенным в центральном узле связи, и абонентским оптическим сетевым терминалом (ONT) производится посредством одного или нескольких пассивных разветвителей установленных по трассе. В зависимости от географической удаленности абонентов от головной

станции выбираются различные типы делителей. В случае, если все абоненты равноудалены от головной станции или разница в удаленности крайне незначительная, используют планарные делители. В случае, если абоненты находятся на разном отдалении от головной станции – используются делители сварного типа. Следует отметить, что интернет-трафик и телефония в сетях PON передает и принимает на длинах волн 1490 нм и 1310 нм, что позволяет использовать в сетях PON двухоконные делители сварного типа.

В качестве компонентов оптических систем зачастую используются делители сварного типа с неравномерным делением. Самым распространенным назначением данных пассивных компонентов является отведение оптической мощности в тестовый порт или на измерительное оборудование, например, в оптических усилителях с обратной связью делители передают часть сигнала на фотодетекторы, контролирующие работу усилителя.

8. ОРГАНИЗАЦИЯ УСЛУГ TRIPLE PLAY (VOIP, IPTV, INTERNET) В СЕТЯХ PON. DBA В СЕТЯХ PON. ОРГАНИЗАЦИЯ CATV В СЕТЯХ PON

8.1. Предоставление услуг в оптических сетях доступа. Сервисная модель предоставления услуг

С применением технологии пассивных оптических сетей возможно предоставление услуг передачи данных, телефонии, IPTV и услуг кабельного телевидения в комплексе.

Возможность предоставления комплексных услуг реализуется с использованием абонентского оборудования ONU/ONT.

Для организации доступа к услугам сети NGN (New Generation Network – сеть нового поколения) посредством PON используется гибридная сервисная модель. Реализация логической модели доступа к услугам сети NGN посредством PON представлена на рисунке 8.1.

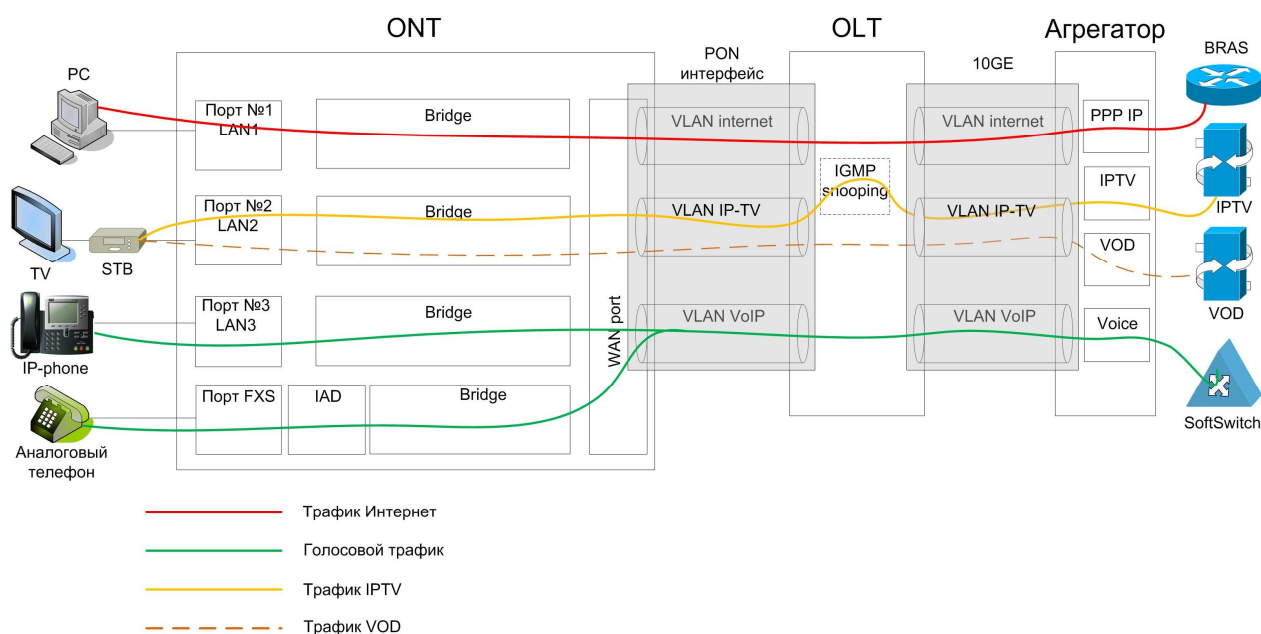


Рис. 8.1. Реализация логической модели предоставления услуг

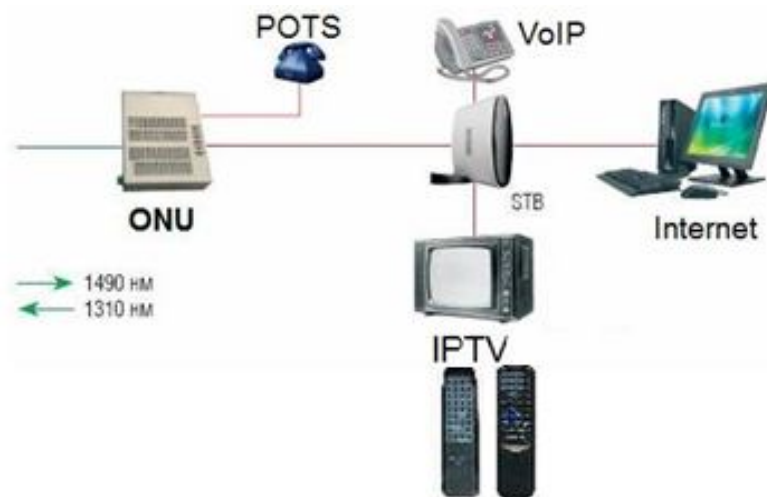
PPPoE-сессия инициируется на оборудовании абонента (ПК), а индивидуальный ONT настроен в режиме Bridge. Терминация PPPoE-сессии производится на BRAS. Интернет трафик и трафик данных внутренней сети абонентов передается в рамках одной PPPoE-сессии. Для доступа к услугам Интернет виртуальному адаптеру PPPoE на оборудовании абонента, присваивается динамический публичный IP-адрес.

При организации доступа к услугам Triple Play на участках между абонентским оборудованием (ONT) и терминирующим оборудованием организуются три сервисных VLAN (реализуется сервисная модель доступа

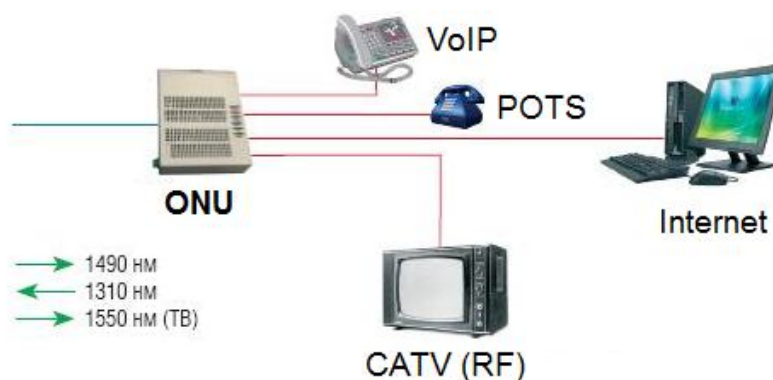
S-VLAN – Service VLAN), в рамках которых передается трафик услуг Интернет, VoIP и один VLAN для передачи трафика IPTV и VoD. На оборудовании ONT осуществляется сопоставление идентификатора физического порта для подключения абонентского оборудования и идентификатора соответствующего сервисного VLAN. Например:

- Port 1 – для подключения ПК и доступа к услуге Интернет;
- Port 2 – для подключения телевизионной приставки STB и доступа к услугам IPTV и VoD;
- Port 3 – для подключения телефона и доступа к услуге VoIP.

Примеры предоставления мультимедийных услуг представлены на рис. 8.2, 8.3.



а)



б)

Рис. 8.2 Предоставление комплекса мультимедийных услуг:
а) по IP (телевизионный сигнал IPTV преобразуется в аналоговый с помощью TV-приставки STB);

б) с использованием оптической поднесущей 1550 нм (TV-приемник подключен непосредственно к ONT через разъем RF)

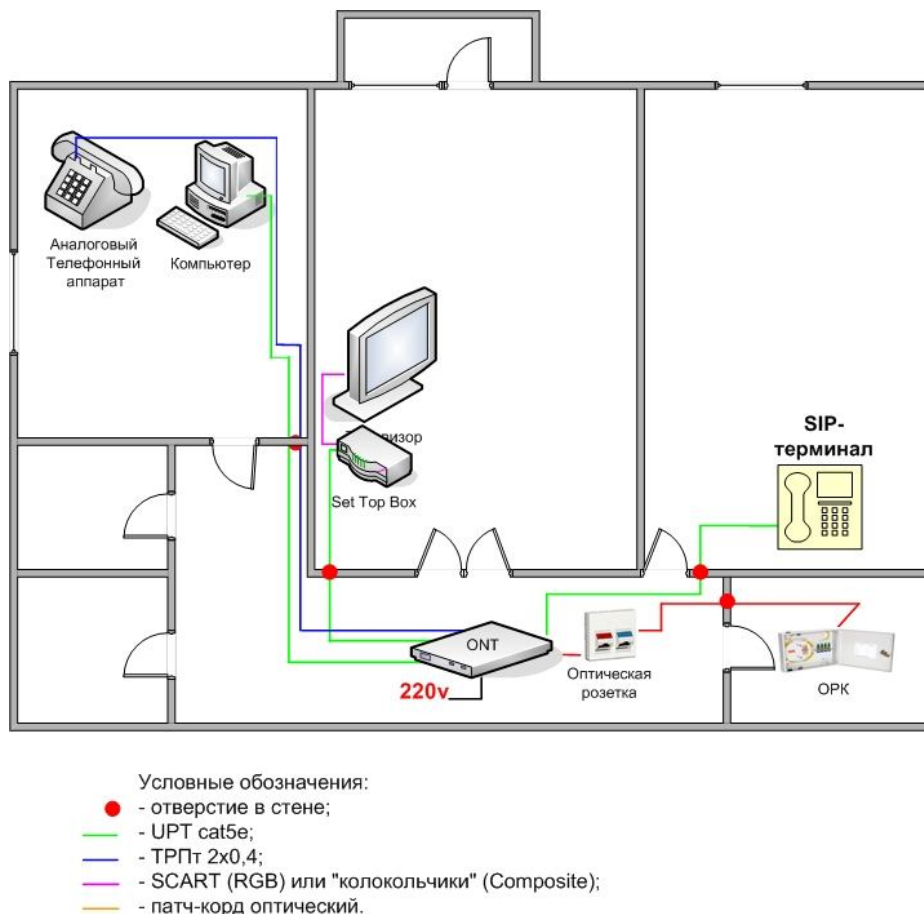


Рис. 8.3. Схема предоставления услуг в помещении абонента.

8.1.1. Включение в сеть стационарного оборудования OLT

В связи с тем, что OLT может обслуживать несколько тысяч абонентов, включение OLT осуществляется в оборудование агрегации трафика PE/AGG.

Общий принцип включения Uplink портов OLT в сеть следующий:

- используются 1GE и 10GE порты uplink;
- при задействовании абонентских портов на OLT в количестве 1/4 от общей емкости – включение OLT в сеть осуществляется с использованием одного порта 10GE или портов 1GE с использованием технологии агрегирования каналов;
- при задействовании абонентских портов на OLT в количестве 1/2 от общей емкости – включение OLT в сеть осуществляется с использованием двух портов 10GE с разных плат;
- при задействовании абонентских портов на OLT в количестве 3/4 от общей емкости – включение OLT в сеть осуществляется с использованием трех портов 10GE с разных плат;

- при задействовании на OLT полной абонентской емкости – включение OLT в сеть осуществляется с использованием четырех портов 10GE с разных плат.

Тип и количество интерфейсов определяется на этапе проектирования. Для предоставления различных услуг на участке ONT-OLT используются следующие различные номера VLAN и портов ONT, например:

- VLAN 10 (порт FE №1) – для доступа абонентов в сеть ПД (для абонентов безлимитных тарифных планов PPPoE-сессия организуется на ONT, для абонентов лимитных тарифных планов – на оборудовании абонента (ПК));
- VLAN 20 (порт FE №2) – для трафика IP-TV;
- VLAN 30 (порт FE №3 или порт FXS) – для голосового трафика;

Приходящие от абонентских терминалов на OLT VLANы с использованием функции VLAN mapping перемаркируются в номера VLAN, используемых на сети филиала электросвязи для предоставления данных типов услуг.

При организации услуги VPN номера VLAN определяются отдельным техническим решением.

Реализация данного принципа приведена на рисунке 8.4.

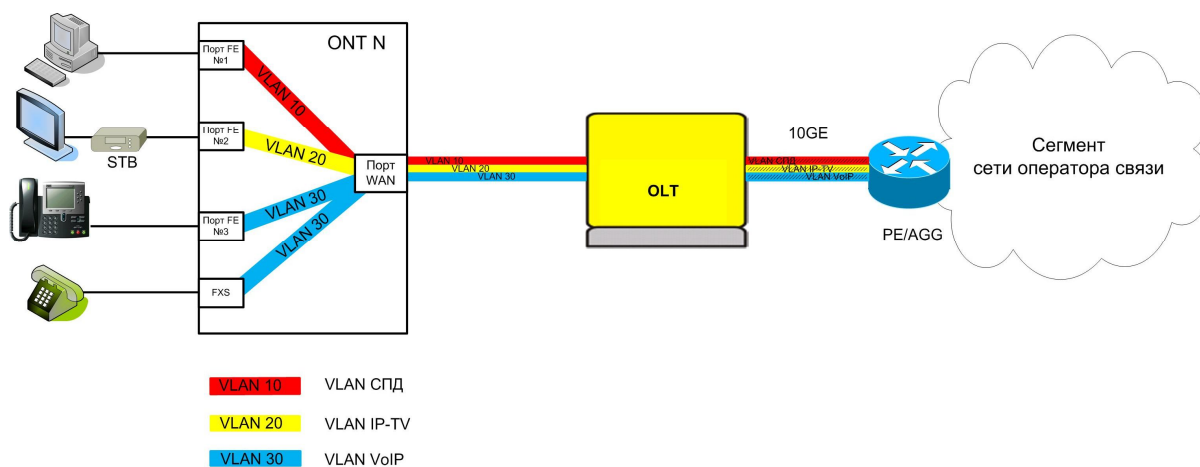


Рис. 8.4. Назначение VLAN.

8.1.2. Подключение абонента к сети PON

При поступлении заявки от абонента на предоставление услуги связи в специализированное подразделение оператора связи (ЕЦОВ, центр обслуживания клиентов) производится регистрация заявления от клиента в базе данных абонентов (далее – БД). В случае наличия технической возможности подключения в БД прописывается порт подключения на OLT в следующем формате: f/s/p – frame/slot/port (OLT/номер платы PON/номер порта на плате PON). Кроме того, в БД заносится профиль абонента и его login.

Регистрация ONT в сети PON может осуществляться одним из двух способов:

1. По серийному номеру ONT.
2. По MAC-адресу ONT.
3. По кодовому слову.

Серийный номер ONT, выдаваемого абоненту, заносится в БД в момент получения его монтером или непосредственно в момент установки в помещении абонента. При включении ONT в сеть в помещении абонента, ONT транслирует свой серийный номер на OLT, который передает его в систему управления оборудованием PON и в БД. БД, в соответствии с серийным номером, направляет профиль данного абонента в систему управления, которая применяет данный профиль на абонентском порту.

Кодовое слово соотносится с портом абонента на OLT. Аналогичное кодовое слово заносится в ONT в момент получения его монтером или непосредственно в момент установки в помещении абонента. При включении ONT в сеть в помещении абонента, ONT транслирует кодовое слово на OLT, где проверяется его соответствие кодовому слову, примененному на порту OLT. Из БД, в соответствии портом абонента, направляется профиль данного абонента в систему управления, которая применяет данный профиль на абонентском порту.

Реализация данной схемы показана на рисунке 8.5.

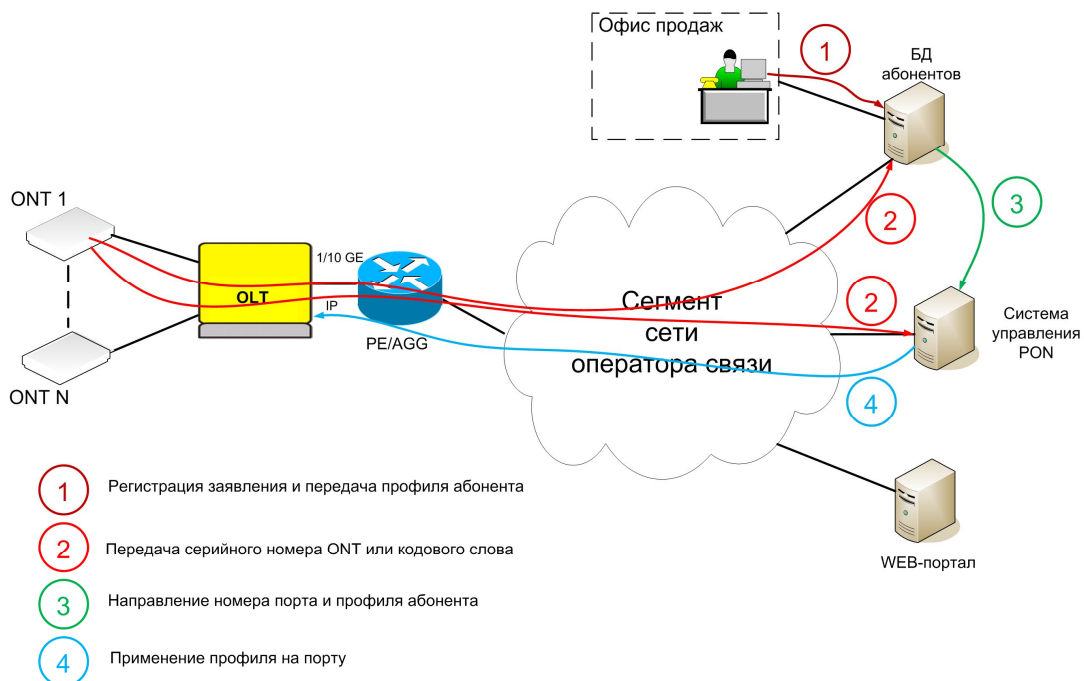


Рис. 8.5. Подключение абонента

8.1.3. Общие принципы обеспечения качества обслуживания

Модель обеспечения качества обслуживания основана на архитектуре дифференцированных услуг (RFC2474, RFC2475, RFC3260). В основе архитектуры дифференцированных услуг (ДУ) лежат механизмы разделения трафика на классы и предоставления каждому классу соответствующего уровня обслуживания.

Каждому классу соответствует определенный код дифференцированной услуги. OLT для каждого кадра производит анализ значения идентификатора ДУ. На основании значения идентификатора ДУ OLT выбирает соответствующий механизм передачи пакета (механизм управления перегрузками). Управление пропускной способностью в случае перегрузок осуществляется с помощью механизма очередей. Пакеты помещаются в очереди, которые упорядоченно обрабатываются.

Классификация трафика абонента производится на OLT. Для осуществления классификации используется VLAN, в рамках которого выполняется передача трафика, поля IP Precedence в принятых от абонента пакетах.

Классификация трафика на OLT

Модель обеспечения качества обслуживания, применяемая на сети использует 7 классов трафика:

- класс трафика управления сетевыми устройствами;
- класс трафика услуги IP телефонии;
- класс трафика услуги IPTV;
- класс трафика VPN уровень Premium;
- класс трафика VPN уровень Silver;
- класс трафика VPN уровень Bronze;
- класс трафика услуги доступа к сети Интернет.

Классификация трафика управления производится на интерфейсе управления OLT.

Классификация трафика услуги IP телефонии производится по признаку VLAN, в рамках которого передается голосовой трафик при предоставлении интегрированных услуг.

Классификация трафика услуги IPTV производится по признаку VLAN, в рамках которого передается видео трафик при предоставлении интегрированных услуг.

Классификация трафика услуги VPN различных уровней производится по полю IP Precedence на порту абонента с подключенной услугой VPN.

Классификация трафика услуги доступа к сети Интернет производится по признаку VLAN, в рамках которого передается трафик абонента.

Пример схемы предоставления услуг

Предоставление услуг телефонии может осуществляться с применением программного коммутатора. Используемый протокол – SIP. При строительстве IMS-ядра подключение абонентов будет осуществляться непосредственно к ядру сети IMS.

Предоставление услуги передачи данных позволяет предоставить клиенту возможность обеспечения связи компьютеров в его локальной сети (в сокращенном варианте это один компьютер) с ресурсами в публичной сети Интернет. Связь осуществляется по протоколу IP.

Предоставление IPTV (Передача видео по IP-сетям) - технология, предполагающая трансляцию видеосигнала по сетям передачи данных с использованием стека протоколов TCP/IP на телевизионный приемник абонента.

Общая схема организации связи, обеспечивающая предоставление услуг приведена на рис. 8.6.

8.2. Динамическое назначение полосы пропускания (DBA) в сетях PON

Структура сетей PON не позволяет абонентским устройствам ONT анализировать трафик друг друга в восходящем направлении.

В связи с этим вводится понятие динамического назначения полосы пропускания (DBA – Dynamic Bandwidth Allocation), представляющего собой механизм или алгоритм динамического распределения полосы пропускания для быстрого перераспределения полосы пропускания на основании **требований службы текущего пользователя**. Коэффициент использования полосы пропускания сети PON может быть увеличен посредством динамической настройки полосы пропускания в соответствии с требованиями абонентских терминалов ONT.

Таким образом, идея DBA заключается в том, что полоса пропускания назначается на основании запроса ONT в восходящем потоке, который сообщает об объемах ожидающих передачу данных, передает данные каждого порта в соответствии с разрешениями, приходящими от OLT.

Основными параметрами оценки алгоритмов DBA являются:

- задержки (delay) и их вариации при распределении полосы пропускания;
- утилизация (эффективность использования) полосы пропускания;
- классификация QoS;
- энергопотребление при выполнении цикла DBA.

В основном алгоритмы DBA улучшают каждый из этих параметров по отдельности.

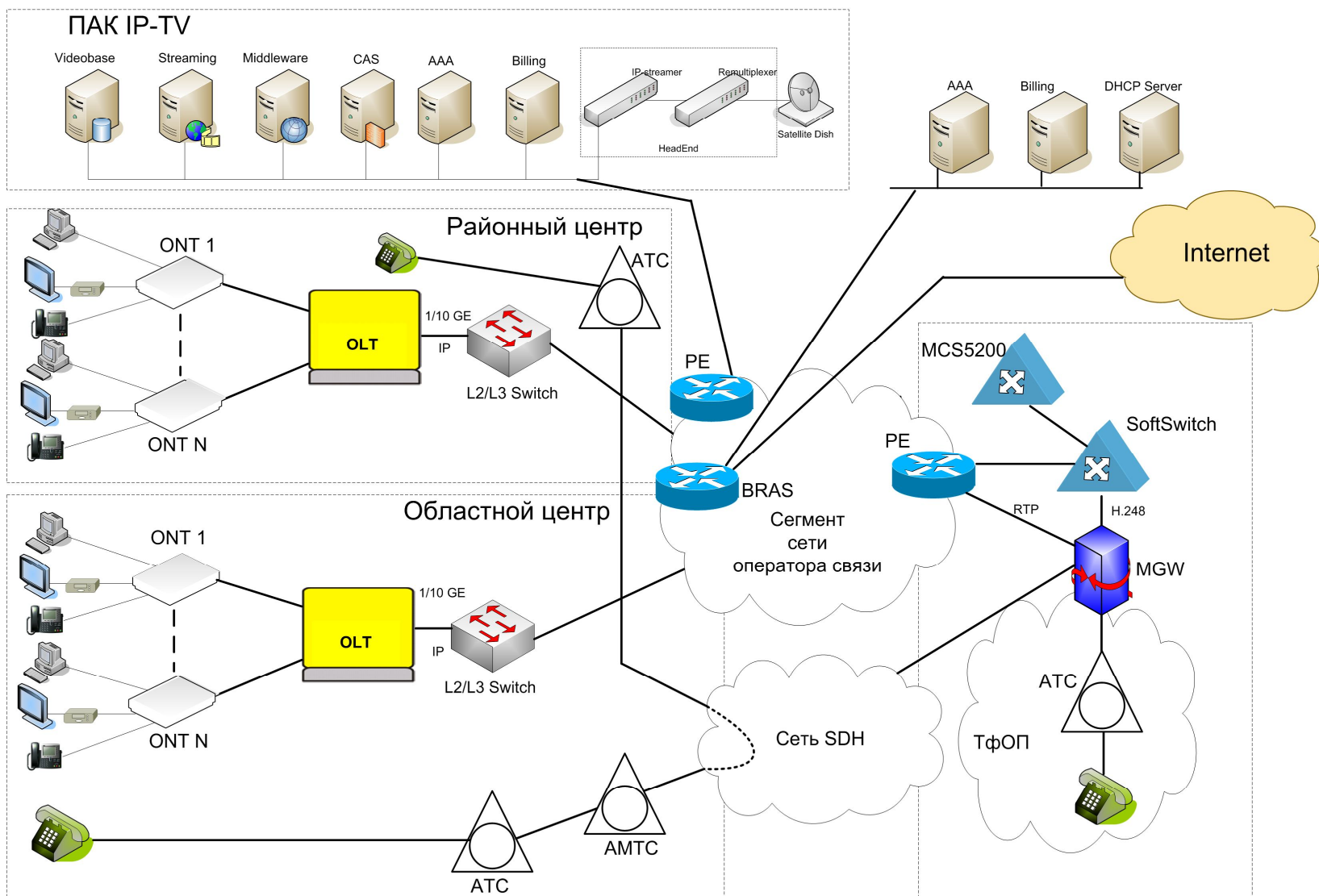


Рис. 8.6. Пример схемы предоставления услуг в сетях PON

8.2.1. DBA в сетях GPON

Процедура DBA управляется со стороны OLT, назначающего полосу пропускания для восходящего потока. Поскольку нисходящий поток является широковещательным (broadcasting), механизм DBA для него неработоспособен. Использование механизма TDMA в восходящем направлении требует, чтобы OLT планировал передачу трафика от каждого ONT в отдельности во избежание коллизий. По сути, каждый ONT получает grant (разрешение), в котором указывается начало и конец передачи. В GPON разрешения передаются в заголовках кадров в нисходящем направлении. Карта распределения полосы пропускания (BW Map) в заголовках данных кадров определяет контейнеры передачи (T-CONT), а также начало и конец передачи: (Alloc-ID + Start + End) для каждого гарантированного окна (таймслота) в восходящем направлении (рис.8.7).

Алгоритмы DBA в GPON делятся на две категории – SR-DBA (Status Reporting DBA) и NSR-DBA (Non Status Reporting DBA). В SR-DBA, основанном на отчете о статусе, T-CONT показывает (индицирует) количество пакетов в буфере ONT, ожидающих своей отправки. Чтобы определить, какое количество трафика назначить для ONT, OLT необходимо знать статус всех T-CONT, относящихся к ONT. Как только OLT принимает эту информацию, то может назначить полосу пропускания соответствующим образом. Когда ONT не имеет информации, ожидающей передачи, оно, при получении разрешения (GRANT) отправляет пустую (idle) ячейку в восходящем направлении, чтобы индицировать, что его буфер пустой. Это информирует OLT о том, что разрешения (GRANTS), изначально предназначенные для данного T-CONT, могут быть использованы для других T-CONTs. Если ONT имеет длинную очередь пакетов, ожидающих отправки в его буфере, OLT может назначить для данного ONT несколько T-CONT.

NSR-DBA обеспечивает назначение полосы пропускания без отчета о статусе буфера ONT, используя механизм мониторинга трафика со стороны OLT.

Необходимо отметить, что осведомленность о QoS в восходящем направлении интегрирована в стандарте GPON с введением концепции транспортных контейнеров (T-CONTs), где тип T-CONT представляет определенный класс обслуживания. Поэтому GPON обеспечивает простое и эффективное средство создания системы для нескольких классов обслуживания (табл. 8.1).

8.2.2. DBA в сетях EPON

В сетях EPON за процедуру DBA отвечает протокол MPCP, работающий на уровне управления средой доступа (MAC – уровень).

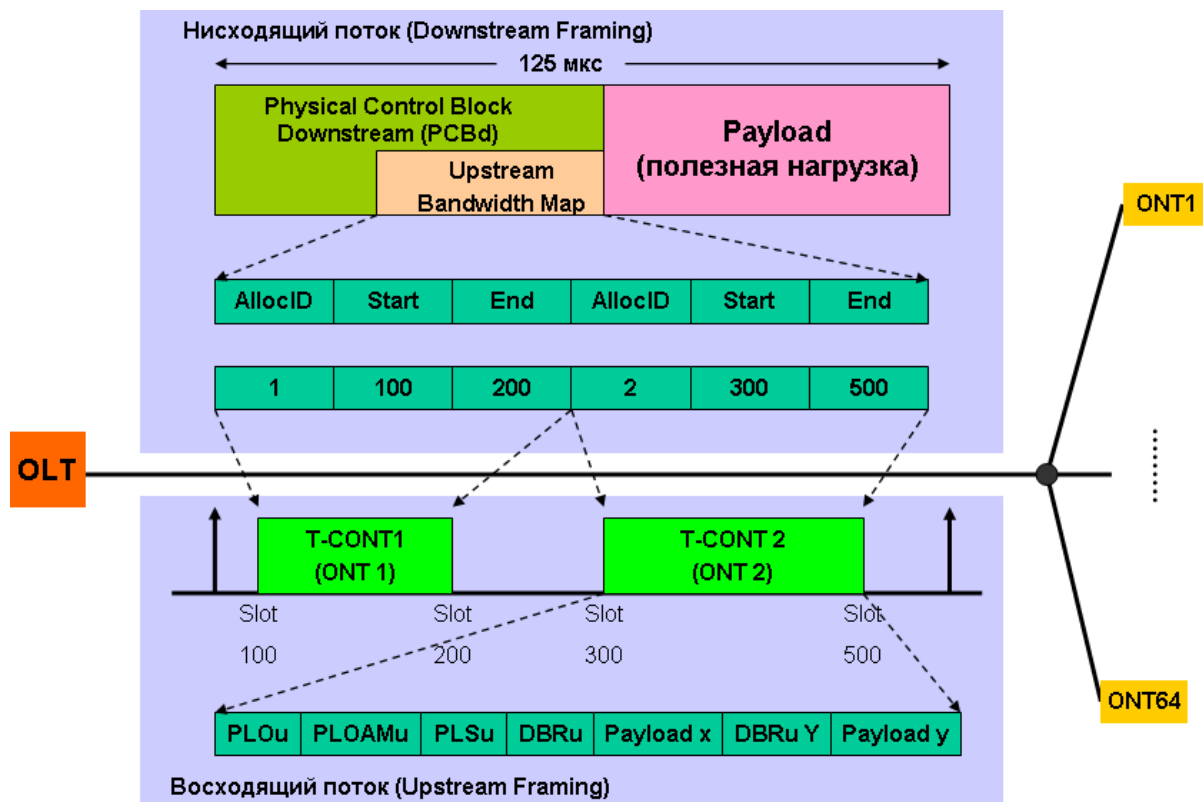


Рис. 8.7. Распределение полосы пропускания в восходящем потоке GPON (на примере T-CONT1 и T-CONT2)

Таблица. 8.1.

Отношение между T-CONT и пропускной способностью в GPON

	T-CONT1	T-CONT2	T-CONT3	T-CONT4	T-CONT5
Постоянная полоса пропускания (Fixed BW)	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Гарантированная полоса пропускания (Assured BW)	Нет	Да	Нет	Нет	Да
Негарантированная полоса пропускания (Non Assured BW)	Нет	Нет	Да	Нет	Да
Полоса пропускания с максимальным усилием (Best Effort BW)	Нет	Нет	Нет	Да	Да
Комбинированная пропускная способность (Combined BW)	Нет	Нет	Нет	Нет	Да

Сообщение GATE используется, чтобы информировать каждый ONT о его времени ожидания (idle time) и размере окна передачи трафика (window size) – времени использования восходящего потока. OLT посылает сообщение GATE каждому ONT последовательно в соответствии с размером окна и задержкой распространения (propagation delay). Размер окна для

каждого ONT считается в соответствии с его требованиями. Требования от ONT приходят к OLT сообщениях REPORT в начале и конце окон в восходящем направлении. Необходимость в полосе пропускания считается в соответствии с загруженностью буфера ONT и текущим окном передачи трафика.

Существует множество критериев распределения полосы пропускания в сетях EPON (рис. 8.8).

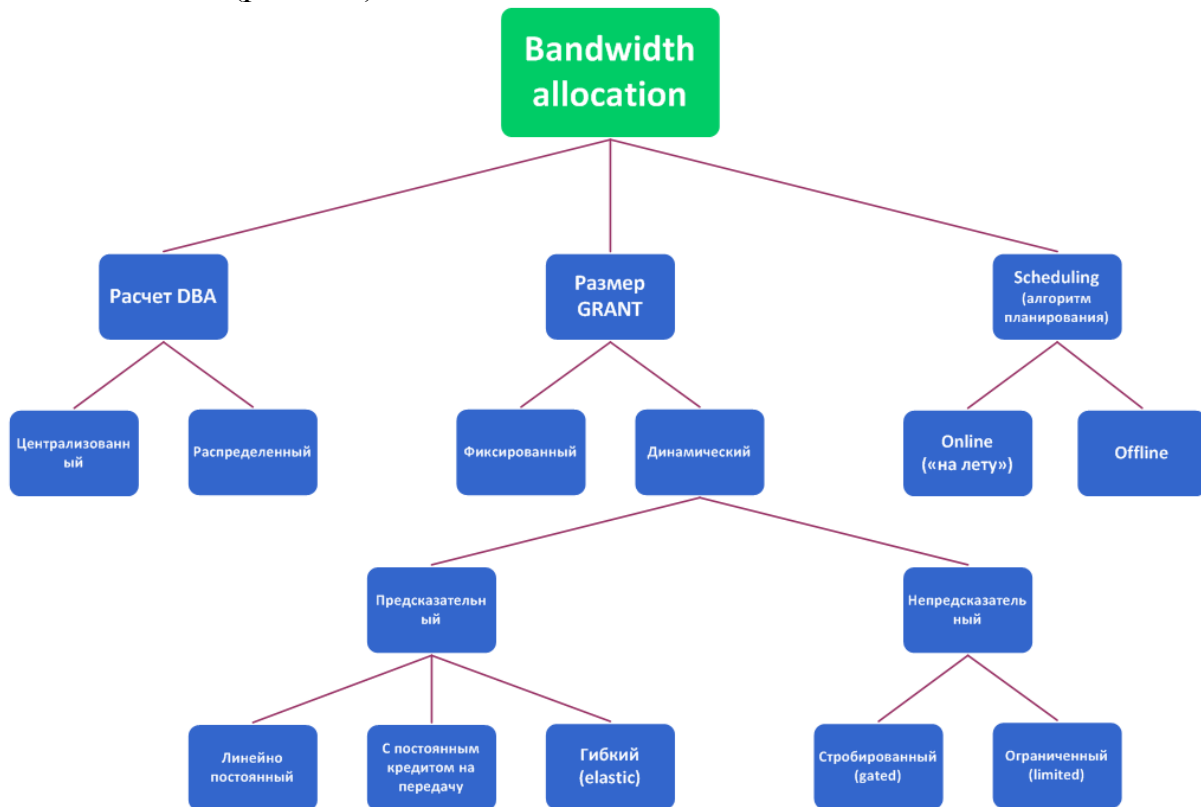


Рис. 8.8. Блок-диаграмма критериев распределения полосы пропускания в сетях EPON

Из блок-диаграммы на рис.8.8 мы видим, что OLT вычисляет полосу пропускания как методом централизованного планирования, так и методом распределенного планирования при участии OLT и ONT. Во втором случае полосу пропускания считает сам ONT, хотя OLT также может выполнять эту функцию.

Рассмотрим подробнее несколько основных алгоритмов DBA в сетях EPON.

8.2.3. Алгоритм DBA IPACT. Описание и принцип действия

(IPACT – Interleaving Polling with Adaptive Cycle Time – чередование опроса с автоматически изменяющимся временем цикла) – один из самых первых алгоритмов, предложенных еще в 2002 году одним из основателей стандарта EPON Гленом Крамером.

IPACT использует метод чередования опроса, при котором каждый последующий ONT опрашивается перед тем, как закончится передача предыдущего ONT, чтобы использовать канал наиболее эффективно. Время цикла подстраивается под требования к ПП от ONT. Определение максимального окна передачи (Maximum Transmission Window – MTW) не позволяет одному ONT занимать всю полосу пропускания.

Механизм работы IPACT опишем следующим образом (рис. 8.9):

- 1) OLT составляет таблицу опроса (polling table) для данного цикла опроса и хранит ее (табл. 8.2).

Таблица 6.2

Пример таблицы опроса ONT для алгоритма IPACT в EPON

ONT - ID	Количество байт в	RTT (Round Trip Time)
ONT-1	6000	200
ONT-2	3200	170
ONT-3	1800	120

Таблица опроса содержит самые актуальные размеры очередей в буферах ONT (из отчетов ONT) за предыдущий цикл C_{n-1} и время прохождения сигнала в прямом и обратном направлении (RTT) для каждого ONT в отдельности.

- 2) OLT генерирует сообщение GATE для первого ONT из таблицы опроса для того, чтобы позволить ONT-1 передать свою информацию в размере 6000 байт в сторону OLT. 64-байтное сообщение GATE является широковещательным, но содержащим информацию об ONU-ID – таким образом, все остальные ONT это сообщение отбрасывают. Сообщение GATE содержит информацию (LLID + Start + Length).
- 3) После получения сообщения GATE от OLT ONT-1 начинает отправлять свои данные из буфера до размера предоставленного тайм-слота (6000 байт) и продолжает принимать данные пользователей. В конце предоставленного тайм-слота ONT-1 генерирует 64-байтное сообщение REPORT, содержащее информацию о ближайшем (безотлагательном) размере очереди в буфере и помещаемое к последнему биту 6000-байтного информационного сообщения.
- 4) В соответствии с таблицей опроса OLT знает, какое количество байт может быть одобрено для ONT-1, также как и RTT → OLT знает, когда примет последний бит от ONT-1. Эта информация помогает OLT планировать и генерировать сообщение GATE для ONT-2, чтобы передать информацию о размере в 3200 байт ДО приема REPORT сообщения от ONT-1. OLT также соблюдает небольшой защитный интервал между двумя последовательными сообщениями GATE,

чтобы обеспечить защиту для RTT флуктуаций и времени обработки различных сообщений GATE и REPORT для различных ONT.

- 5) Через некоторое время приходит информация от ONT-1, содержащая статус буфера и окончание предыдущего гарантированного тайм-слота. OLT использует сообщение REPORT от ONT-1, чтобы обновить таблицу опроса для данного ONT, чтобы использовать данную информацию для C_{n+1} цикла.
- 6) Аналогично предыдущим шагам, OLT знает, когда приходит последний бит от ONT-2 → планирует и генерирует сообщение GATE для ONT-3, чтобы ONT-3 передал 1800 байт в сторону OLT. Как результат, первый бит от ONT-3 приходит сразу после последнего бита от ONT-2.

Таким образом, перед тем, как OLT примет сообщение REPORT от ONT-3, он уже знает, когда придет последний информационный бит от ONT-3. Поэтому OLT начинает генерировать и отправлять сообщение GATE в сторону ONT-1 для следующего цикла опроса C_{n+1} , в таком порядке, что первый бит данных от ONT-1 прибывает сразу же после последнего бита данных от ONT-3.

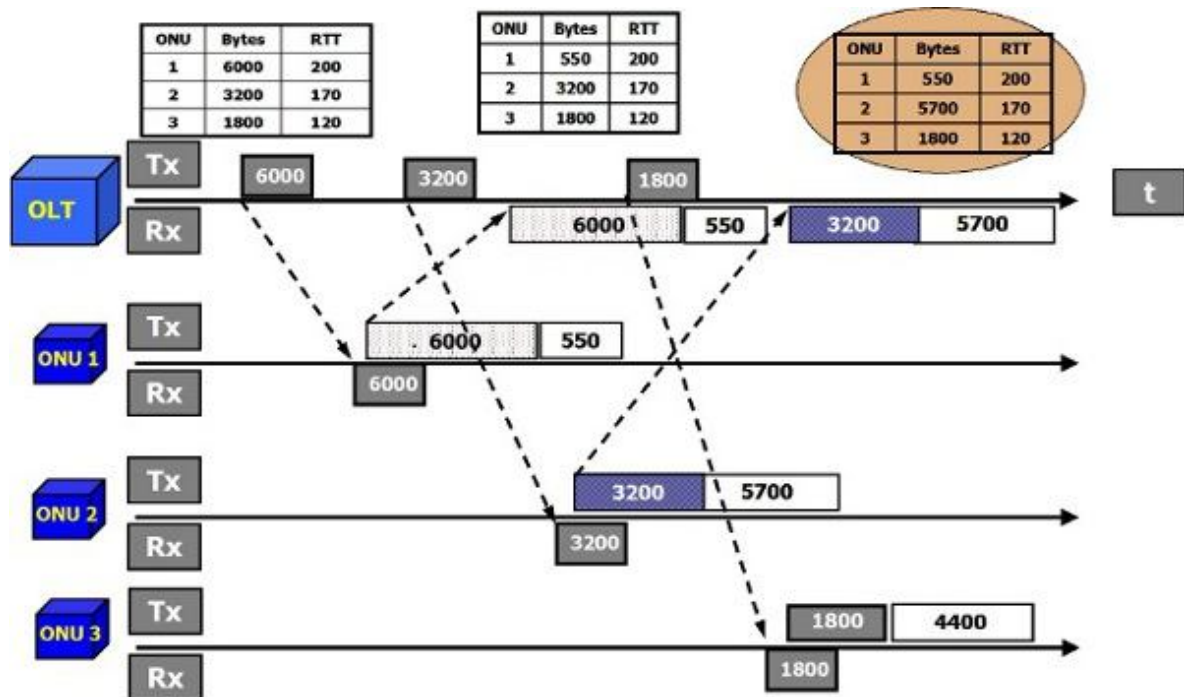


Рис. 8.9. Схема работы алгоритма IPACT в EPON

8.3. Предоставление услуг кабельного телевидения (КТВ / CATV)

Для операторов кабельного телевидения и интернет провайдеров существуют следующие задачи:

- построить сеть для предоставления услуг интернет и кабельного ТВ по оптике – в данном случае, по сети PON;
- использовать одно абонентское устройство ONT для всех услуг;
- обеспечить удобную эксплуатацию;
- решение должно быть универсальным: подходить как для сектора одноэтажной застройки, так и для многоквартирных домов.

Организация доступа к сети кабельного телевидения осуществляется по следующей схеме. Формирование группового сигнала производится на головной станции путем получения сигнала с телекоммуникационных спутников (DVB-S) или по наземным сетям (DVB-T). Групповой высокочастотный телевизионный сигнал через оптический передатчик подается в волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), и доводится до места расположения OLT. Для передачи видеосигнала КТВ используется отдельная длина волны (1550 нм) и дополнительное оборудование как на центральном узле, так и у абонента. На центральном узле устанавливается усилитель сигнала кабельного телевидения и волновой мультиплексор (WDM) для введения видеосигнала в волокно. У абонента устанавливается ONT с RF-интерфейсом, от которого сигнал КТВ подается по коаксиальному кабелю к телевизионному приемнику. В ONT абонента в данном случае интегрирован приемопередатчик типа triplexer (рис. 8.10). Также отметим, что при включении в схему PON системы КТВ оптический передатчик сигналов ТВ имеет выходной коннектор с полировкой торца типа APC (угловой физической контакт). Это связано с тем, что при использовании коннекторов с другими типами торцов в местах разъемного соединения волокон может появиться достаточно сильный отраженный сигнал, который способен ухудшить режим работы передатчика. Общий принцип предоставления услуг кабельного телевидения представлен на рис. 8.11 – 8.13.

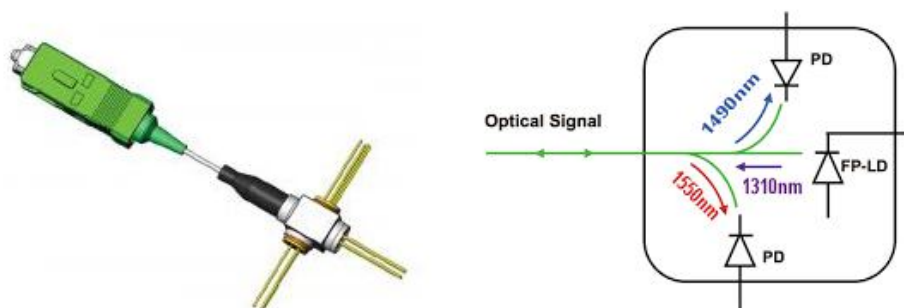


Рис. 8.10. Внешний вид и схема триплексера в ONT

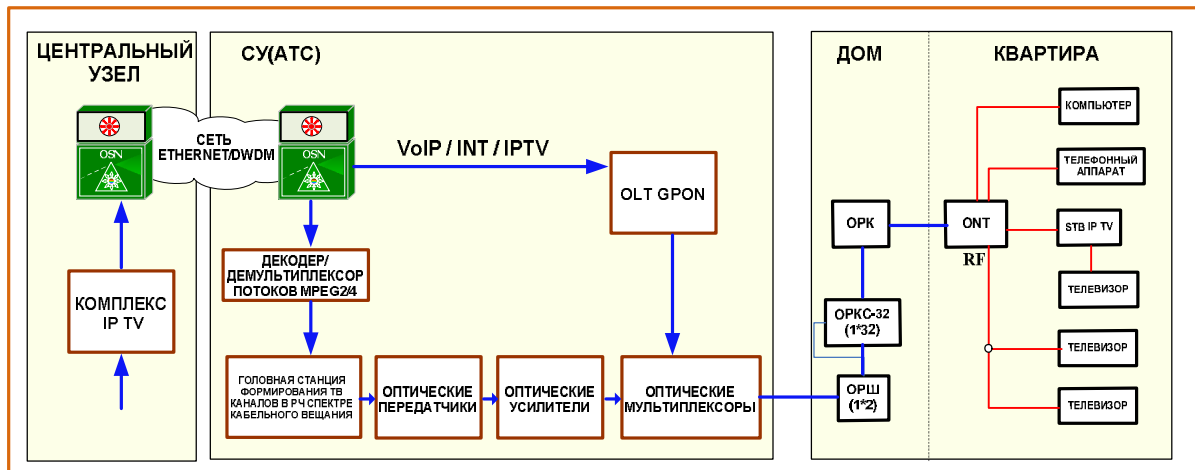


Рис. 8.11. Пример типовой схемы предоставления услуги КТВ

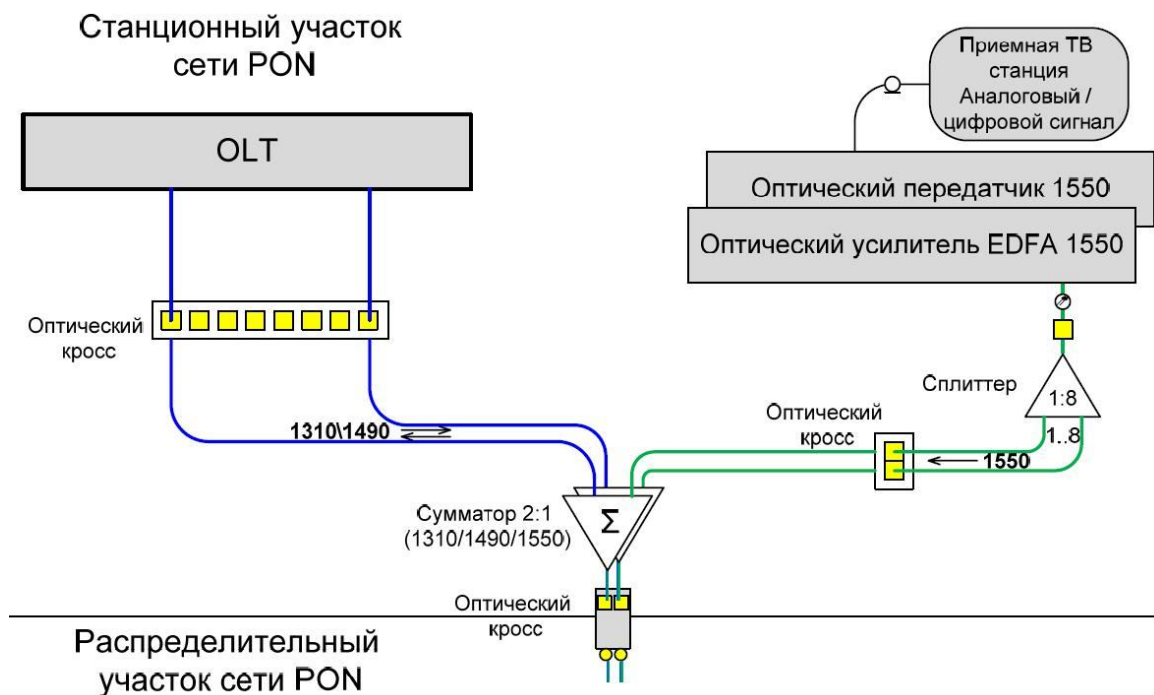


Рис. 8.12. Подробная схема включения услуги КТВ поверх сети PON.

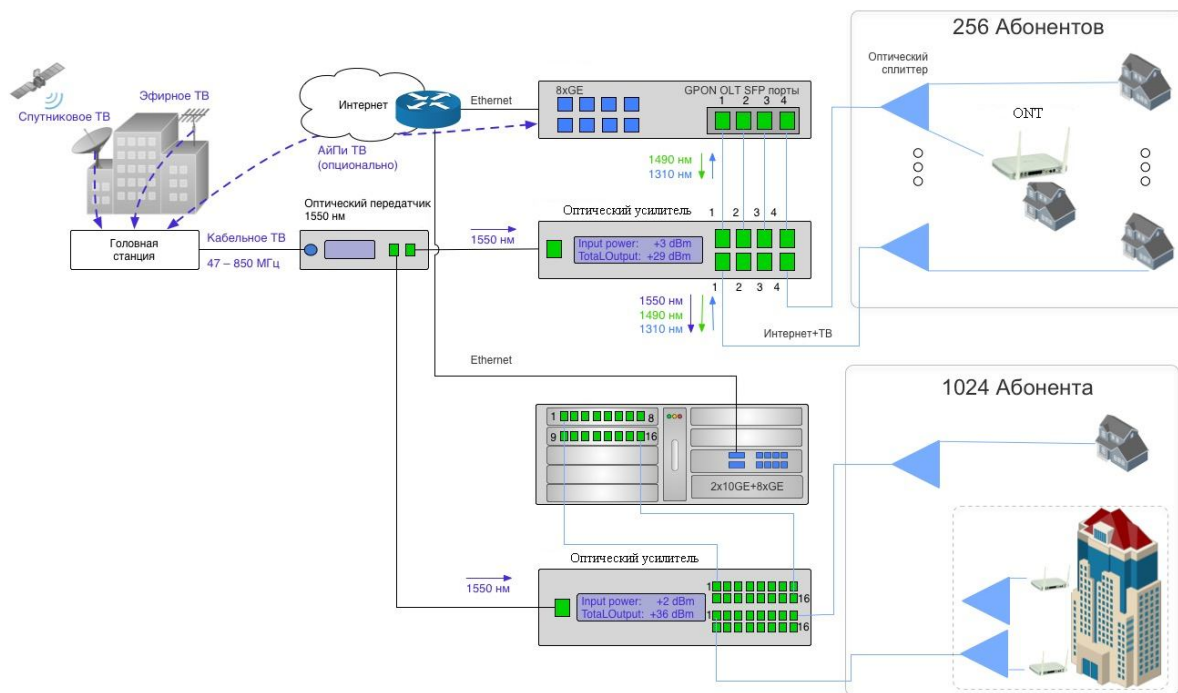


Рис. 8.13. Примеры предоставления услуг КТВ для частного сектора и сегмента многоквартирной застройки

9. ИЗМЕРЕНИЯ В СЕТЯХ PON

В ОСД, в частности в пассивных оптических сетях измерения связаны с достаточно большими затратами времени и средств. Поэтому измерительные приборы должны быть тщательно подобраны с учетом особенностей именно таких сетей, а этапы и методы измерений должны соответствовать международным стандартам для PON.

Отметим, что благодаря использованию древовидной топологии точка-многоточка (PtMP) и технологии временного мультиплексирования (TDM), в сетях PON применяются немного другие схемы и принципы измерений.

9.1. Источники потерь в сетях PON

В волоконно-оптических сетях существует большое количество паразитных явлений, ухудшающих качество передачи, однако особое влияние имеют лишь 4 из них: *затухание, возвратные потери, дисперсия и вынужденное неупругое рассеяние.*

Затухание – потеря мощности светового сигнала в процессе распространения по оптоволокну. В обычных оптических сетях потеря мощности происходит, в основном, на сварных и механических соединениях, а также из-за явления рассеяния света при попадании световой волны на примеси в волокне. В сетях PON основным источником потерь являются пассивные оптические сплиттера (> 20 дБ).

Возвратные потери (ORL – Optical Return Loss) – потеря мощности светового сигнала за счет отражения от механических и некачественных сварных соединений. При прохождении света через такие соединения часть светового потока отражается обратно в линию, ухудшая качество передачи. ORL определяется как логарифмическое отношение мощности базового сигнала к мощности отраженного, поэтому, чем показатель ORL выше, тем лучше. При этом отраженный сигнал можно уменьшить, используя коннекторы с другим типом полировки. Обычные коннекторы с UPC полировкой имеют значения ORL около 50..55 дБ. При использовании APC коннекторов ORL увеличивается до 65..70 дБ.

Показатель ORL, наряду с затуханием, характеризует качество оптической линии. Тем не менее, отраженный сигнал сильно влияет только на качество передачи аналогового TV сигнала (особенно, если он имеет амплитудную модуляцию). Если же в сети PON не планируется передача CATV, то измерение ORL можно опустить.

Дисперсия – «размытие» формы светового импульса и уменьшение его амплитуды в процессе распространения по оптоволокну. Дисперсия приводит к наложению импульсов друг на друга и увеличению количества ошибок при приеме сигнала. Данное явление возникает из-за того, что из-

лучение лазера имеет несколько спектральных составляющих (хроматическая дисперсия) или поляризационных составляющих (поляризационно-модовая дисперсия), распространяющихся по оптическому волокну с разной скоростью. Достаточно большая дисперсия приводит к ошибкам распознавания сигналов фотоприемником и, опять же, к ухудшению соотношения сигнал/шум, увеличению коэффициента ошибок или искажениям ТВ сигнала. Большая из двух составляющая – хроматическая дисперсия – зависит от длины линии, длины волны сигнала и параметров волокон. Такая дисперсия реально оказывает существенное влияние на форму сигнала на длинных линиях (десятки, сотни км) при высокой скорости передачи (более 1 Гбит/с), особенно на длине волны 1550 нм. Расчетное значение хроматической дисперсии может использоваться при проектных расчетах (особенно GPON), но измерения этого параметра при строительстве и эксплуатации, как правило, не проводятся.

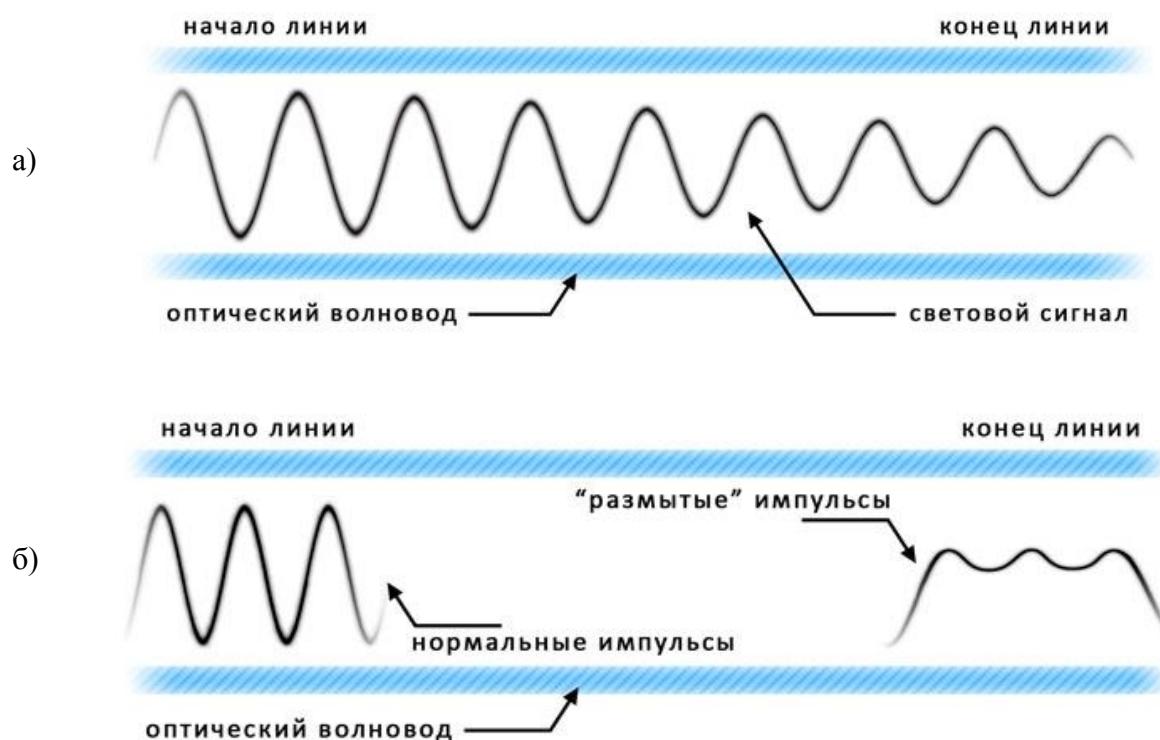


Рис. 9.1. Влияние затухания (а) и дисперсии (б) на форму сигнала

Вынужденное неупругое рассеяние. Различают Рамановское (SRS – Spontaneous Raman Scattering) и Бриллюэновское (SBS – Spontaneous Brillouin Scattering) рассеяния. Суть данных явлений заключается в том, что при большой плотности мощности одиночного сигнала (~10..20 дБм для SBS и ~30..40 дБм для SRS) происходит искажение коэффициента преломления волокна, в результате чего в месте искажения формируются

встречные (стоксовы) и сонаправленные (антистоксовы) сигналы на смежных длинах волн ($\lambda \pm \Delta\lambda$) (рис. 9.2).

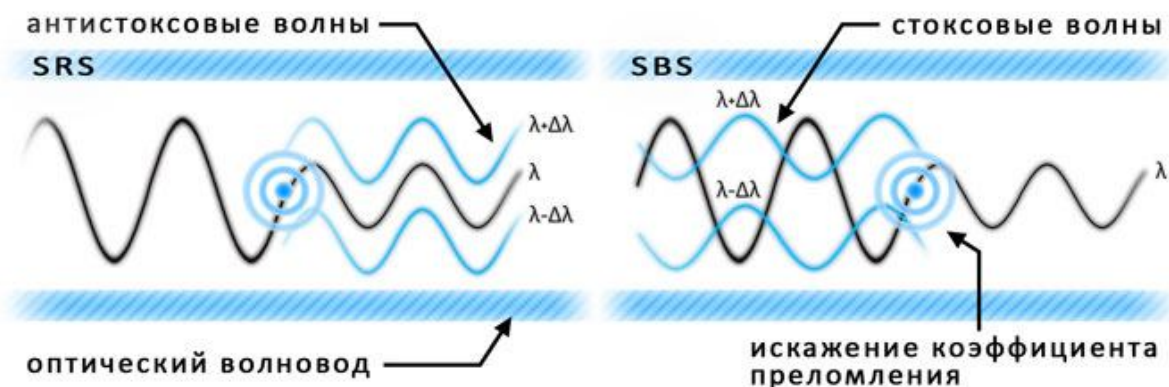


Рис. 9.2. Влияние вынужденного неупругого рассеяния

Нелинейные эффекты в оптических волокнах возникают при достаточно большой величине оптической мощности, вводимой в волокно. Обычно это происходит при использовании в PON выделенной оптической несущей 1550 нм для передачи ТВ сигналов. При превышении некоторого порогового уровня мощности, вследствие нелинейных видов рассеяния сигнала (Мандельштама-Бриллюэна, Рамана) в волокне возникают новые частотные составляющие, имеющие встречное и попутное направления. По сути, происходит выведение части оптической мощности из детектируемого спектра, т.е. дополнительные потери сигнала, передаваемого на основной оптической несущей. А обратно распространяющийся паразитный сигнал способен ухудшить работу оптического передатчика. В этом случае происходит уменьшение соотношения несущая/шум ТВ сигнала. Однако проявление нелинейных эффектов происходит при уровнях мощности более 7–10 дБ, а современные оптические передатчики ТВ сигналов часто имеют систему подавления таких эффектов даже при уровнях до 18 дБм.

Как следствие, в сетях PON эффект SRS можно не рассматривать вообще, а эффекта SBS стоит опасаться только при добавлении в PON сеть кабельного телевидения, т.к. средняя мощность CATV сигнала после усилителя ~19..20 дБм. Однако, большинство современных TV транмиттеров используют специальные SBS-С лазеры (лазеры с внешней модуляцией с "размытой" частотой излучения), которые позволяют значительно снизить эффект SBS. Таким образом, при строительстве и эксплуатации PON сети необходимо следить всего за 2 показателями: затуханием в линии и возвратными потерями (если в сети передается CATV сигнал).

Для большей ясности перечислим основные источники потерь, исходя из архитектурных особенностей сетей PON (рис. 9.3):

- соединения OLT (станционный участок – СУ);
- WDM – фильтр (при организации кабельного телевидения CaTV);

- оптическое волокно;
- соединения строительных длин (линейный распределительный участок);
- оптические сплиттера – основные источники потерь;
- соединения ONU/ONT (абонентский участок – АУ).

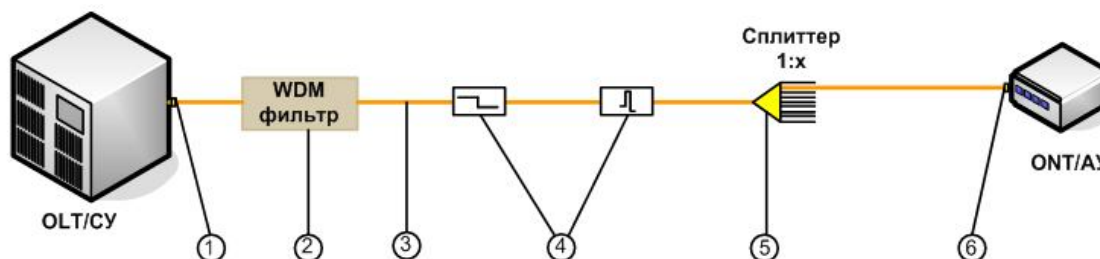


Рис. 9.3. Основные источники потерь в сетях PON

9.2. Измерительное оборудование для сетей PON. Основные характеристики

Оптический измеритель мощности (Optical Power Meter – OPM) и Стабилизированный источник света (Stabilized Light Source – SLS) – самые распространенные измерительные приборы, которые подходят как для FTТх, так и для PON сетей. При выборе SLS и OPM нужно обратить внимание, чтобы они «умели» работать на длинах волн 1310, 1550 и 1625 нм (опционально). Также стоит удостовериться, что OPM способен стабильно измерять сигнал в диапазоне -40..20 дБ (верхняя граница диапазона обусловлена необходимостью измерять мощность CATV сигнала на выходе усилителя; нижняя граница определяется, исходя из мощности лазера SLS (-7...-5 дБ) и максимального затухания в PON сети (~30 дБ)).

Анализатор затухания (Optical Loss Test Set – OLTS). Представляет собой комплект, состоящий из измерителя мощности (OPM) и источника излучения (SLS). Большинство OLTS представлены одним прибором, «на борту» которого есть и измеритель, и излучатель – данный подход крайне эффективен для двустороннего тестирования линии связи (при наличии пары таких приборов). Кроме того, современные модели OLTS снабжаются визуальным дефектоскопом и модулем для измерения ORL, что увеличивает их функциональность.

Оптический рефлектометр во временной области (Optical Time Domain Reflectometer – OTDR). Один из самых востребованных приборов для диагностики сетей. Имея доступ к одному концу волокна, рефлектометр может построить график распределения мощности сигнала по оптической линии – рефлектограмму. Анализ рефлектограммы позволяет определить все необходимые параметры линии (погонные затухания волокна, потери мощности между узлами сети и возвратные потери), а также быст-

ро и точно локализовать обрывы и другие дефекты волокна. Рассмотрим основные характеристики рефлектометра с точки зрения применения в сетях PON.

Одной из важнейших характеристик OTDR является *динамический диапазон* (измеряется в дБ). Он определяет, насколько может ослабнуть сигнал к концу линии, чтобы рассеяние от этого сигнала было корректно детектировано фотоприемников рефлектометра. Если перед инсталлятором стоит задача просветить небольшой участок сети, то подойдут OTDR с динамическим диапазоном ~30 дБ; если же надо просветить участок сети PON целиком, то стоит выбирать рефлектометр с динамическим диапазоном не менее 35 дБ (лучше 39..40 дБ).

Также одной из важных характеристик рефлектометра является *ширина (длительность) зондирующего импульса* (измеряется в нс), т.к. она определяет грань между точностью и дальностью измерений (динамическим диапазоном). Чем короче импульс, тем точнее рефлектограмма, но тем меньше динамический диапазон. И наоборот, чем шире импульс, тем больше динамический диапазон, но тем меньше детализация рефлектограммы. Хороший OTDR может излучать импульсы шириной от 5 до 20000 нс.

Таким образом, если перед инсталлятором стоит задача снять рефлектограмму с небольшого участка сети (например, между двумя пассивными оптическими сплиттерами), то стоит обращать внимание на OTDR с минимальной шириной импульса ~5...10 нс для максимальной детализации рефлектограммы. Если же необходимо снять рефлектограмму между оконечными узлами сети (между OLT и ONU/ONT), то нужен OTDR с большим динамическим диапазоном (≥ 35 дБ).

Рабочая длина волны рефлектометра (измеряется в нм) – определяет спектральный диапазон, в котором будут производиться измерения. Учитывая особенности (передача прямого и обратного каналов на разных длинах волн), необходимо иметь OTDR с излучателями на длинах волн 1310 нм и 1550 нм. Если позволяют материальные возможности, то неплохо иметь еще излучатель на 1625 нм. На этой волне можно производить измерения, мониторинг действующей PON без перерыва связи, т.к. сигналы рефлектометрии будут разнесены по длине волны с информационными. Кроме того, на 1625 нм значительно лучше видны неоднородности, связанные с критическими изгибами волокон.

Мертвая зона (измеряется в метрах) – характеризует временное «ослепление», перегрузку фотодетектора рефлектометра при попадании на него большой отраженной мощности, особенно от разъемных соединений при подключении патч-кордом к линии. Мертвая зона по отражению представляет собой минимальное расстояние между двумя соседними отражающими неоднородностями, обнаруживаемыми с помощью рефлектометра. Величина, составляющая 2 – 3 м, считается достаточно хорошей.

Мертвая зона по затуханию обычно несколько больше. Она показывает минимальное расстояние, необходимое рефлектометру для обнаружения неотражающего события после сильного отражения. Для реальных измерений вполне подходит значение 8–10 м.

Измерители возвратных потерь ORL. Применяются для измерения полных возвратных потерь или возвратных потерь на отдельных пассивных элементах. Данные приборы в виде отдельного устройства практически не выпускаются – вместо этого модули измерения ORL встраиваются во многие OLTS и OTDR. Измеритель ORL по принципу работы чем-то похож на рефлектометр, однако он определяет уровень возвратных потерь более точно. Основной характеристикой измерителя ORL является рабочий диапазон (дБ). Диапазон ORL для обычных измерителей составляет ~50 дБ, что соответствует отражению от UPC коннектора. Если же необходимо измерять самые слабые отраженные сигналы (от APC коннекторов), то диапазон ORL должен быть не ниже 60 дБ.

Специализированный PON-тестер. Малогабаритный ручной тестер, похожий на обычный измеритель оптической мощности. Измерения уровня оптической мощности позволяют определить работоспособность ONU/ONT, OLT, а иногда и определить участок, где произошло повреждение волокна.

Особенность сетей PON в том, что абонентский терминал работает только в том случае, когда он подключен к рабочей линии. Поэтому измерения мощности можно производить, только включив прибор «на проход» в работающую линию. Тогда как обычный измеритель мощности не сможет измерить мощность сигнала от ONU/ONT.

PON-тестер включается в разрыв линии в любой точке сети и измеряет мощность одновременно на трех длинах волн: 1310, 1490 и 1550 нм (рис. 9.4). Прибор имеет два порта с разъемами типа SC/PC для подключения со стороны станции и со стороны абонента. Затухание, вносимое тестером в линию, обычно не превышает 1 дБ (максимально до 1,5 дБ), что не так много для абонентской линии. Фотодетектор PON-тестера имеет хорошую развязку, порядка 40 дБ для всех рабочих длин волн. Это значит, что, например, при измерении сигнала на длине волны 1490 нм проходящие в том же волокне сигналы 1310 нм и 1550 нм будут отфильтровываться, т.е. попадут на фотодетектор, уменьшенные по уровню в 10000 раз (40 дБ). Поскольку оборудование PON использует принцип временного разделения каналов (TDMA), то каждый абонентский терминал ONU/ONT работает только в коротком временном интервале (например, 1/64 цикла при 64 абонентах PON). Поэтому PON-тестер определяет не общую мощность в волокне, а *пиковое значение* импульса на длине волны 1310 нм. Это позволяет правильно определить уровень сигнала, передаваемого от ONU/ONT.

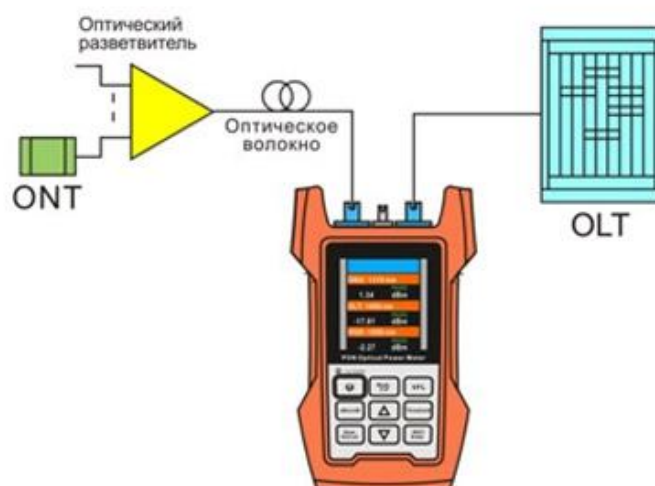


Рис. 9.4. Использование PON-тестера
(измерение со стороны OLT на 1490 нм и 1550 нм).

При передаче в сети сигналов кабельного ТВ на длине волны 1550 нм уровень мощности обычно достаточно высок (до +20 дБм и выше). Например, обычный измеритель мощности рассчитан на уровни не более +5 дБм. Специализированный PON-тестер позволяет измерять сигналы с уровнем до +25 дБм.

9.3. Основные этапы проведения измерений и тестирования в PON

Измерения и тестирование любой оптической сети, в том числе и PON, можно разделить на 4 этапа:

- входной контроль;
- строительно-монтажные измерения;
- приемо-сдаточные измерения;
- эксплуатационные измерения

Входной контроль

Производится до начала строительства сети. Его целью является проверка и подтверждение технических характеристик элементов сети (погонного затухания оптического кабеля, затухания и возвратных потерь (ORL) на адаптерах и сплиттерах). Однако данный этап требует огромного количества времени, поэтому зачастую инженеры пропускают его, полагаясь на результаты лабораторных испытаний (так называемые Test Reports – отчеты об испытаниях), которые входят в комплект поставки пассивных элементов сети.

Строительно-монтажные измерения (СМИ)

На данном этапе производится оценка качества строительства сети – измеряются погонные затухания пролета кабеля, затухания на отдельных пассивных компонентах (адаптерах и сплиттерах) и сварных соединениях, полные затухания между оконечными узлами сети, а также возвратные потери (ORL).

СМИ должны производиться после завершения строительства каждого сегмента сети. Это позволит более оперативно находить и исправлять ошибки, которые могли быть допущены при инсталляции данного сегмента. При измерениях каждого сегмента сети крайне рекомендуется использовать рефлектометр (OTDR) для получения более точной характеристики линии. Однако это занимает много времени, поэтому к использованию рефлектометра прибегают только в том случае, если результаты измерений обычными приборами существенно отличаются от теоретических расчетов.

Зачастую при строительстве сети используют источник стабилизированного излучения (SLS) и оптический измеритель мощности (OPM) (рис.9.5). Включая их в разные точки сети, можно измерять затухания как на отдельных пассивных элементах и соединениях, так и потери мощности всей оптической трассы.

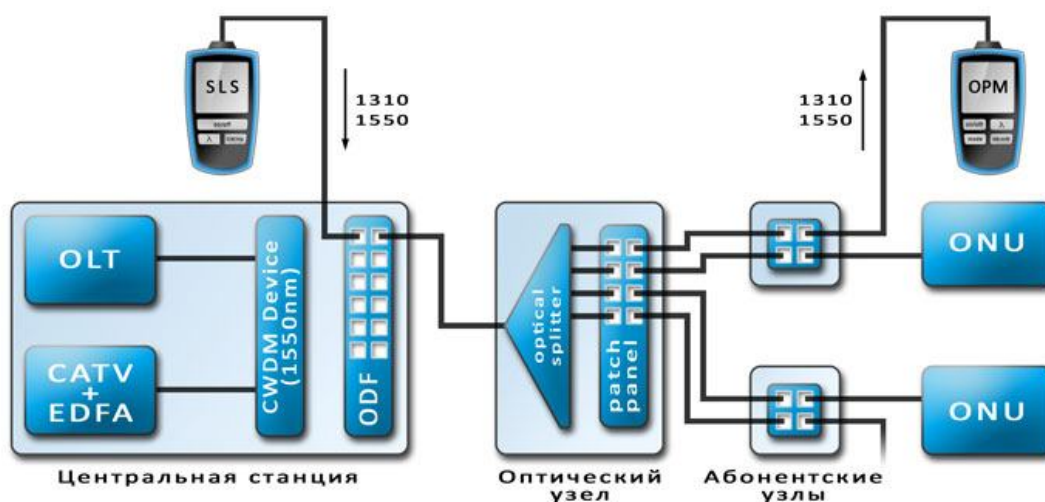


Рис. 9.5. Подключение SLS и OPM

Более рациональным решением является приобретение двух анализаторов затухания (OLTS), которые представлены устройством «3 в 1» (излучатель, измеритель мощности, измеритель ORL). Такой подход позволяет не только производить двусторонний анализ затухания (не меняя приборы местами), но и снимать с линии характеристики возвратных потерь (ORL).

В крайних случаях, если у инсталлятора нет источника стабилизированного излучения (SLS), вместо него можно использовать передатчик OLT (SFP модуль с длиной волны излучения 1490 нм), или передатчик TV транмиттера (1550 нм). В этом случае измерения будут менее точными (± 1 дБ), т.к. передатчики терминального оборудования являются не постоянными источниками света. При такой схеме теряется гибкость измерения, т.к. источник излучения привязан к одной точке сети.

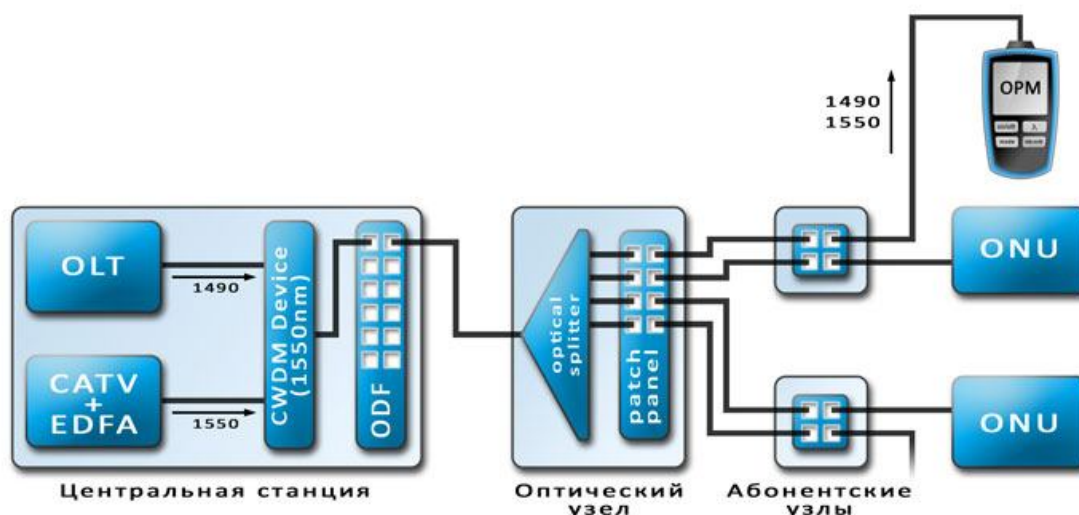


Рис. 9.6. Подключение OPM при использовании передатчика OLT вместо SLS

При работе с OPM может возникнуть одна проблема – измерение мощности сигнала на конкретной длине волны. Обычные OPM имеют широкополосный фотоприемник и не имеют встроенных фильтров для выделения той или иной длины волны, т.е. они измеряют групповой сигнал. Если в PON сети передается только Интернет трафик, то проблем не возникает (OPM измеряет сигнал на 1490 нм). Проблемы появляются, если в сети помимо Интернета присутствует CATV сигнал на длине волны 1550 нм. В этом случае OPM необходимо подключать через CWDM-фильтр, который отсекает ненужный сигнал (рис. 9.7).

Как уже отмечалось ранее, с недавнего времени на рынке измерительных приборов появилось более элегантное решение – специализированный PON-тестер. Это проходной измеритель мощности, который включается в линию и измеряет сигнал сразу на 3 длинах волн (1310, 1490 и 1550 нм), внося при этом минимальные (< 1.5 дБ) затухания в линию.

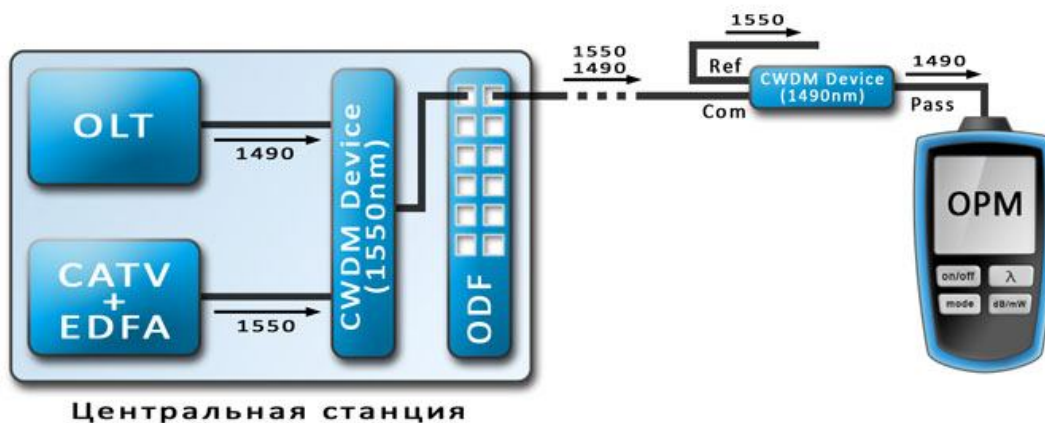


Рис. 9.7. Подключение OPM через CWDM-фильтр

На окончательном этапе строительства сети все ее оптические показатели должны быть задокументированы. Для этого используется рефлектометр (OTDR) (рис. 9.8), т.к. рефлектограмма является показателем качества строительно-монтажных работ и отражает все необходимые оптические характеристики линии. Кроме того, при возникновении неполадок в сети наличие опорных рефлектограмм позволяет быстро обнаружить место и характер неисправности путем сравнения опорной рефлектограммы с «аварийной».

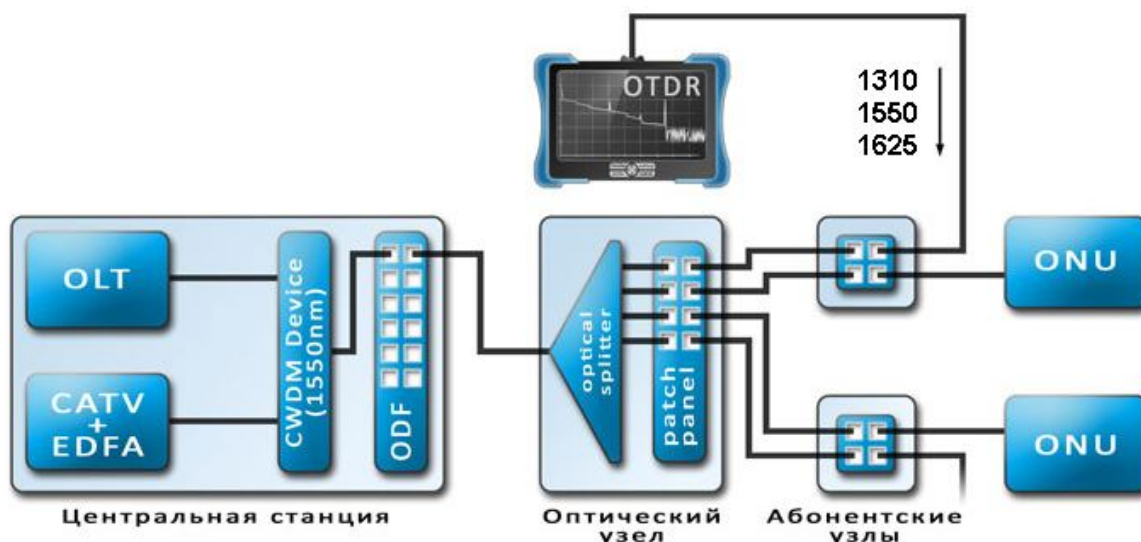


Рис. 9.8. Подключение рефлектометра (OTDR)

Ответим на наиболее существенные вопросы, которые могут возникнуть при работе с OTDR в PON.

1) *Можно ли «просветить» участок сети PON от OLT до ONT целиком?* Ответ: да. Правда есть один нюанс. Можно выставить на рефлектометре большую ширину импульса (тем самым, увеличив его динамиче-

ский диапазон) и «просветить», т.е. прозондировать участок сети PON до самого конечного узла, но в этом случае мы получим неинформативную («размытую») рефлектограмму. Для сохранения детализации ширина импульса должна быть не более 30 нс, но рефлектометров, способных просветить весь участок сети PON при таком коротком импульсе мало и стоят они очень дорого (как уже отмечалось ранее, необходимо ориентироваться на OTDR с динамическим диапазоном ~39..40 дБ).

2) *В каком направлении нужно снимать рефлектограмму?* Ответ. Несмотря на кажущуюся очевидность, снимать рефлектограмму от OLT-а в сторону ONU/ONT нельзя. При этом на приемник рефлектометра вернется огромное количество отраженных сигналов со всех веток сети - анализировать такую рефлектограмму будет практически невозможно. Поэтому вариант остается только один – снимать рефлектограмму от абонентских узлов ONU/ONT по направлению к OLT (рис. 9.9 – 9.10). Также очень удобно подключиться рефлектометром непосредственно к участку, на котором с помощью OLT идентифицировано повреждение. Но такое подключение возможно только в распределительных устройствах (шкафах, боксах), где есть разъемные подключения

3) *На каких длинах волн нужно снимать рефлектограмму?* Ответ. Рефлектограмму лучше делать на 3-ех длинах волн (1310, 1550 и 1625 нм). Длины волн 1310 и 1550 нм используются для того, чтобы получить более точное представление о характере неоднородности в оптическом волокне (например, на длине волны 1550 нм происходит бóльшая потеря мощности сигнала на макроизгибах волокна, чем на 1310 нм). Длина волны 1625 нм может использоваться (опционально) для снятия рефлектограмм на этапе эксплуатации сети.



Рис. 9.9. Пример рефлектограммы, снятой со стороны абонента (ONU/ONT)

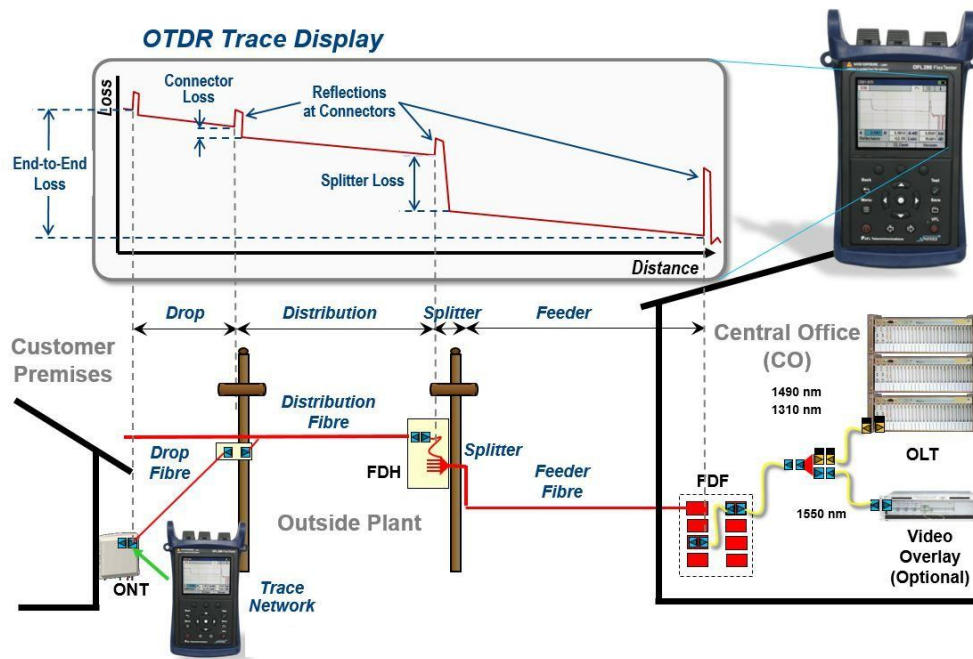


Рис. 9.10. Взаимосвязь между рефлектограммой, снятой со стороны абонента (ONU/ONT), и реальными участками архитектуры сети PON

Приемодаточные измерения

На данном этапе строительного-монтажные работы закончены и остается провести последние контрольные измерения для подтверждения качества оптической линии. Под контрольными подразумеваются следующие виды измерений:

- измерение мощности передающего оборудования (OLT и CATV трансмиттер);
- измерение мощности на входе и выходе каждого абонентского узла ONU/ONT.

Если хотя бы одно измерение даст результат, отличный от проектных расчетов, измерения продолжатся уже «внутри» сети, а не только в конечных оптических узлах.

Эксплуатационные измерения

Обычно эксплуатационные измерения в оптических сетях связи делятся на плановые и аварийные. Плановые измерения проводятся периодически с целью контроля основных параметров сети и прогнозирования возможного ухудшения качества передачи.

Однако при реальной эксплуатации PON настоятельная потребность в измерениях возникает лишь в случае аварийной (или предаварийной) ситуации. В этом случае основная задача эксплуатационных измерений – быстро обнаружить причину ухудшения параметров сигнала или повреждения.

Зная характер повреждения, обычно можно спрогнозировать его причину, но не всегда. Например, уменьшение уровня сигнала на приеме может быть связано как с деградацией лазера оптического передатчика, так и с проблемами в линейном тракте: изгиб кабеля или патч-корда с недопустимо малым радиусом, избыточное натяжение волокон в воздушном кабеле и т.п. Поэтому для начала нужно воспользоваться возможностями системы диагностики OLT и оптического передатчика КТВ. Оба устройства позволяют проконтролировать выходной уровень лазерного источника, его ток накачки, температуру и др. параметры. А система управления OLT также способна идентифицировать каждый абонентский терминал ONU/ONT и контролировать его работоспособность в сети. Выявив количество и местонахождение неработающих ONU/ONT, можно оперативно локализовать поврежденный сегмент сети. Однако нельзя забывать, что отключенный от сети питания терминал будет так же восприниматься системой управления OLT неработающим, как и ONU/ONT, не работающие из-за обрыва в сети.

Отметим, что данный этап (эксплуатационные измерения) вступает в силу, когда в сети PON уже есть подключенные абоненты – таким образом, проводить измерения на «живой» сети становится значительно труднее. Здесь могут возникнуть две основные проблемы: как проводить измерения на действующей сети и как подключить измерительное оборудование в оптический узел, не нарушая работу сети? В рабочей PON сети измерения на длинах волн 1310 и 1490 нм запрещены, так как это приведет к ошибкам передачи данных, поэтому остается использовать резервную длину волны 1550 нм. Чтобы ввести резервный сигнал из SLS в волокно и вывести его из волокна на OPM, достаточно использовать 2 (два) CWDM-фильтра (один на передающей и один на приемной стороне) (рис. 9.11). Аналогично можно подключить рефлектометр. Если в сети передается CATV сигнал (т. е. длина волны 1550 нм занята), то для измерений PON используется длина волны 1625 нм (о которой упоминалось ранее). Именно поэтому желательно приобретать SLS, OPM и OTDR, способные работать с этой длиной волны.

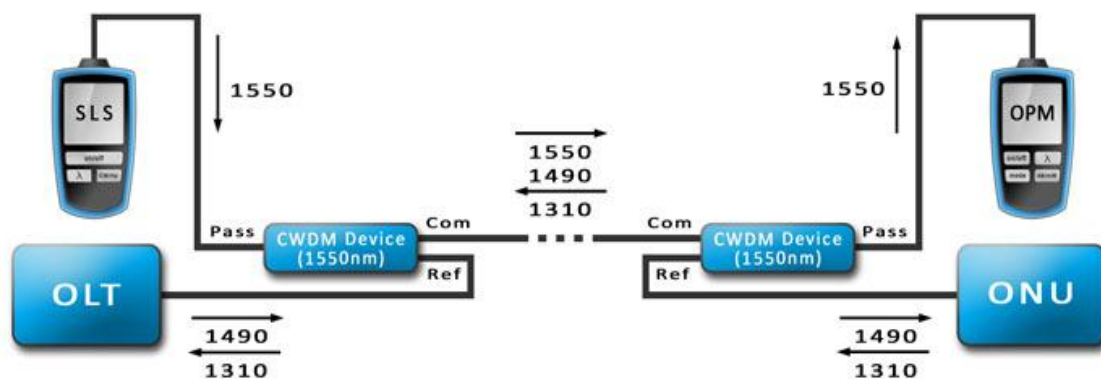


Рис. 9.11. Пример проведения измерений в PON без разрыва связи

К сожалению, подключить измерительное оборудование в оптический узел, не нарушив работу сети, нельзя (это возможно только при наличии свободных выводов на сплиттере или патч-панели). Однако установка CWDM-фильтра в линию занимает меньше нескольких секунд, поэтому абоненты вряд ли заметят отсутствие Интернета.

Еще одной проблемой является измерение мощности сигнала с ONU/ONT при подключении нового абонента. Если подключить к ONU/ONT измеритель мощности, то он ничего не покажет, т.к. ONU/ONT не передает сигнал без разрешения OLT. Если измеритель подключить к ONU/ONT через сплиттер, то он покажет неверное значение. Это происходит, потому что обычный измеритель вычисляет среднее значение мощности за определенный интервал времени, а ONU/ONT большую часть времени «молчит». Решить эту проблему позволит упомянутый ранее специализированный проходной PON-тестер. На длине волны 1490 и 1550 нм он работает как обычный измеритель мощности, но на длине волны 1310 нм он работает в импульсном режиме, т.е. измеряет пиковую амплитуду сигнала, что позволяет корректно определять мощность передатчика ONU/ONT⁵.

⁵ PON-измеритель необходимо подключать непосредственно к выходу ONU/ONT; если PON-измеритель включить в середине линии, то будет невозможно отследить мощность сигнала от конкретного терминала ONU/ONT

10. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СЕТЕЙ PON

Данный подраздел служит дополнением к методическим указаниям по курсовому проектированию ОСД и описывает основные аспекты, связанные с проектированием и строительством сетей PON в зонах малоэтажной застройки (сельских поселений, коттеджных поселков и т.д.).

10.1. Малоэтажный (частный) жилой сектор в РФ

Возможности

- не менее 15-20 млн. семей имеют дома в сельской местности;
- по-прежнему низкое проникновение услуг связи вне городов;
- рост потребности в качественной связи, прежде всего, в ШПД.

Особенности

- меньшая (по сравнению с городом) концентрация абонентов;
- отсутствие специализированных зданий и помещений связи;
- размещение оборудования, преимущественно, на улице;
- слабая оснащенность инженеров-инсталляторов;
- подвеска на опорах – основной способ прокладки слаботочных кабелей.

Элементарный пример организации ОСД по технологии PON изображен на рис. 10.1.

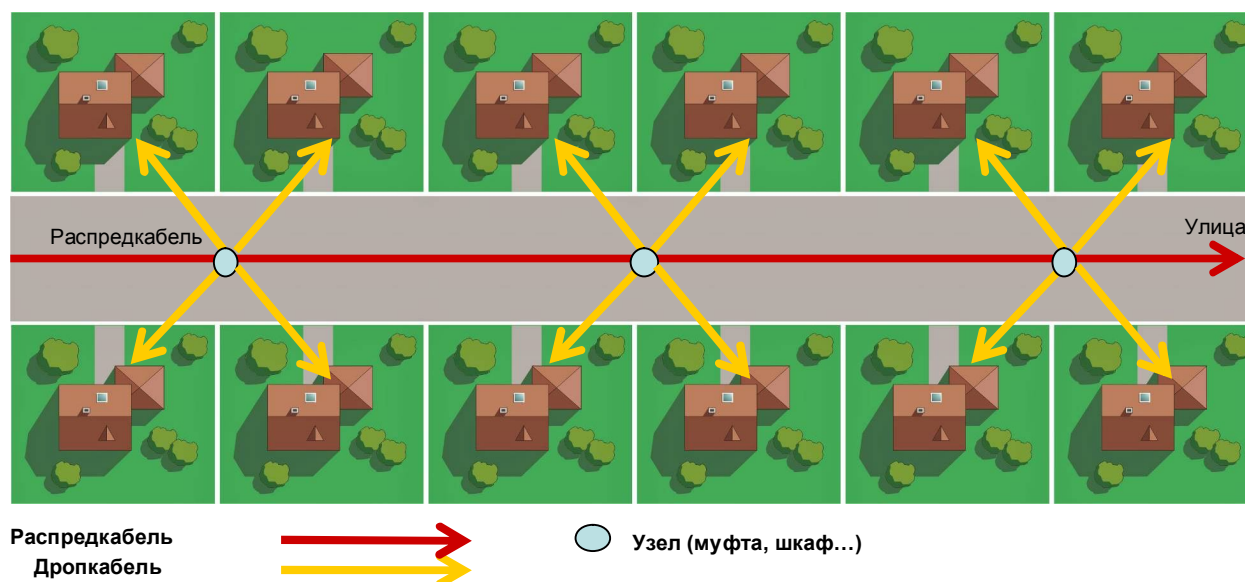


Рис. 10.1. Пример организации ОСД по технологии PON в малоэтажном секторе

Жилая зона представляет собой совокупность улиц. По **центральной** улице (улицам) прокладывается *магистральный* кабель. Вдоль каждой **второстепенной** улицы прокладывается *распределительный* кабель

Группы домовладений подключаются в узлах (распределительных муфтах) посредством подведения *абонентских дронкабелей*

Оптические волокна магистрального кабеля подходит к ОРШ (оптическому распределительному шкафу), либо к магистральной муфте, где происходит первое разделение (1-ый каскад сплиттирования). Из ОРШ, либо магистральной муфты выходят волокна распределительного кабеля, которые в оптических распределительных муфтах разделяются второй раз (2-ой каскад сплиттирования), чтобы непосредственно подойти к абонентам (рис. 10.2).

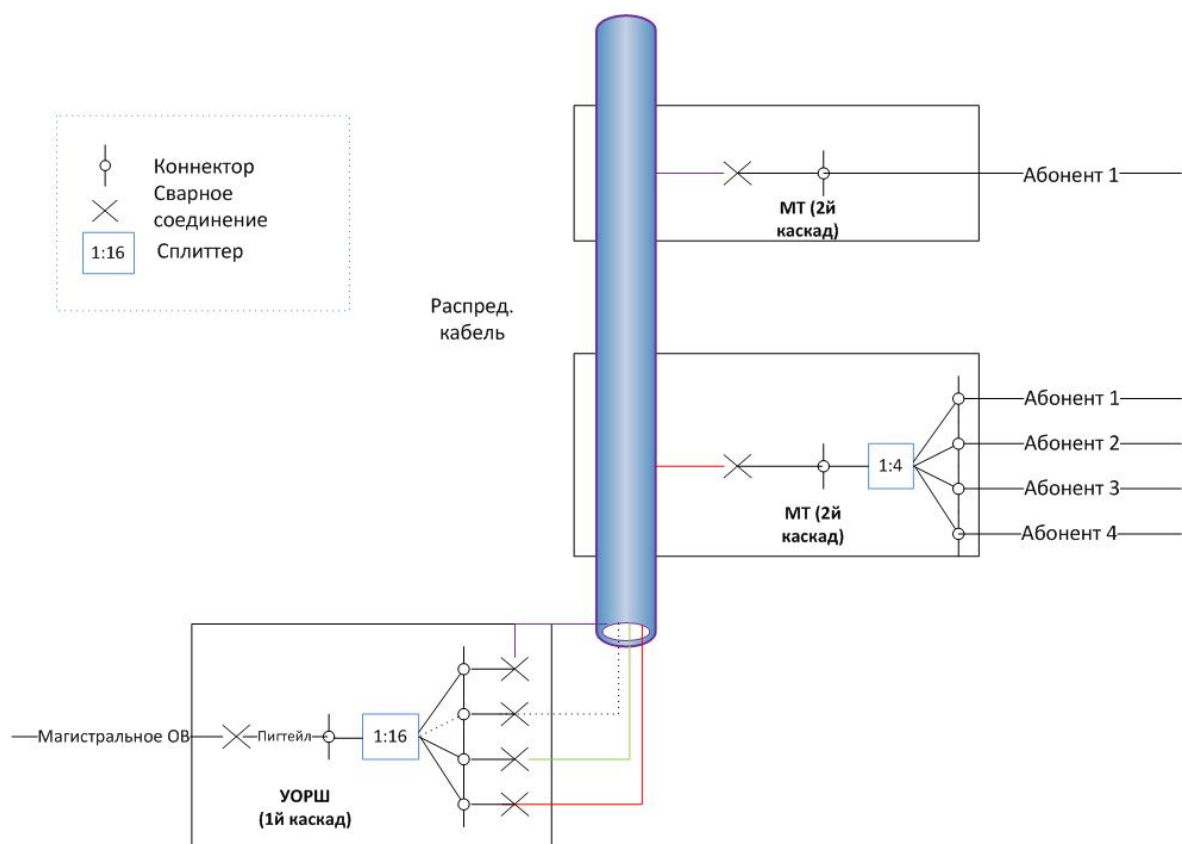


Рис. 10.2. Двухкаскадная схема (1x16 + 1x4) организации связи по технологии PON

На рис. 10.3 наглядно изображена структура сети PON со всеми базовыми элементами.

Отметим, что в зонах малоэтажного жилого сектора в большинстве случаев используется *воздушный способ прокладки* оптического кабеля, прежде всего распределительного кабеля и абонентского дронкабеля.

Основные особенности воздушной прокладки (рис. 10.4, 10.5):

- запас оптического кабеля размещен вдоль опоры освещения;

- абонентский дроп-кабель можно подвешивать без дополнительного троса;
- кабельная система не требует заземления, так как полностью диэлектрическая.



Рис. 10.3. Структура сети PON в малоэтажном жилом секторе



Рис. 10.4. Запас оптического кабеля вдоль опоры освещения

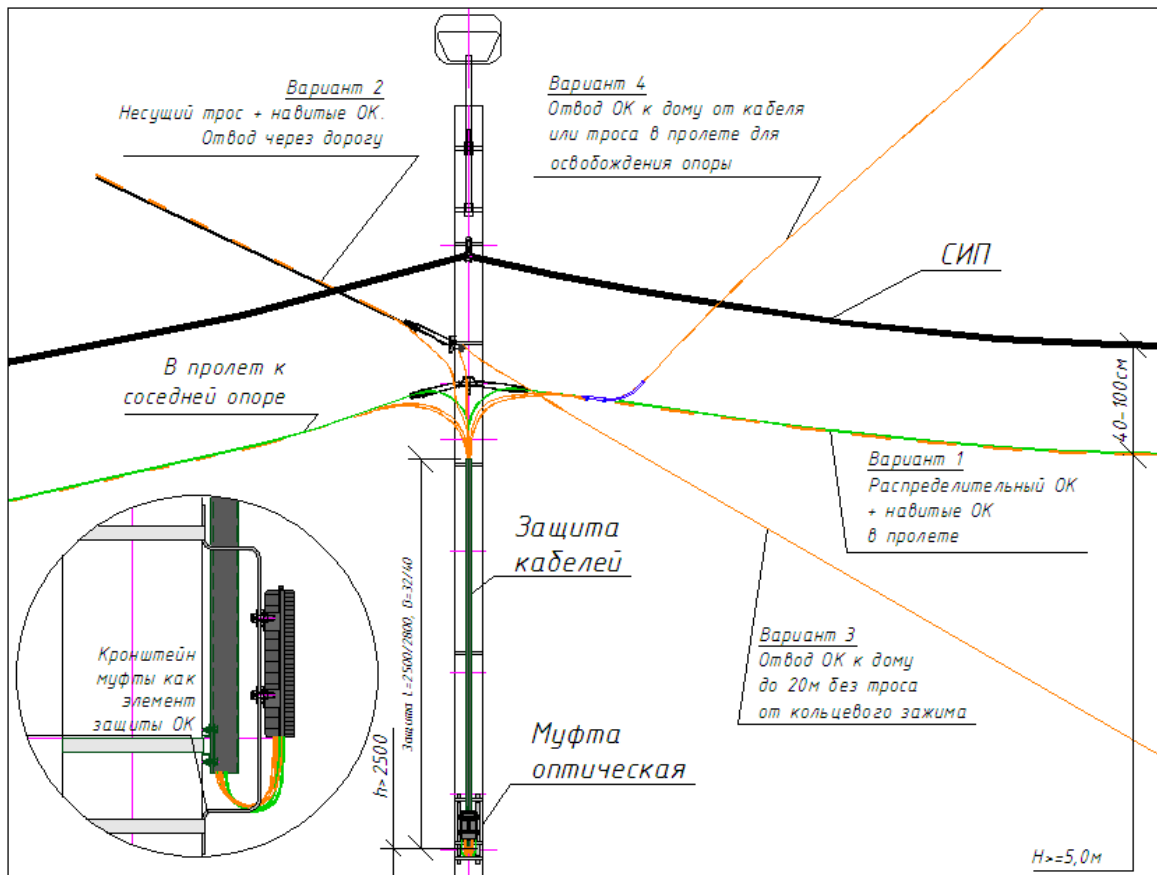


Рис. 10.5. Схема прокладки ВОК по опорам силовой/осветительной сети

С учетом вышесказанного приведем примеры спецификаций для малоэтажного населенного пункта с проникновением технологии PON для 128 абонентов (табл. 10.1 – 10.2).

Таблица 10.1

Спецификация кабельной системы для участка сети доступа на 128 абонентов

Описание	Артикул	Количество
Магистральный кабель	ТПОд2-П-8А 1,2 кН	2000 м
Распределительный кабель	ТПОд2-П-8А 1,2 кН	2000 м
Магистральная муфта со сплиттером 1x8	FOSC-FTTH-6-1x24/1-0	2 шт.
Распределительная муфта со сплиттером 1x8	FOSC-FTTH-6-1x24/1-4ASC	16 шт.
Абонентский дроп-кабель (патчкорд)	РС-ОМП-2Д-G.657.A1-SC/APC-30	128 шт.
Оптическая абонентская розетка	AD-ASC	128 шт.

Спецификация активного оборудования 1G-EPON
для участка сети доступа на 128 абонентов

Описание	Артикул	Количество
Коммутатор OLT	LTE-2X GEPON	1 шт.
Трансивер (приемопередатчик OLT)	PON OLT SFP (Class B+/Class C+)	2 шт.
Абонентское устройство ONT (например, 1 порт PON(SC), 4 порта LAN 10/100/1000 Base-T, 1xUSB, 2xFXS, WiFi (802.11n, 300 Мбит/с, 2.4 ГГц)	ONT NTE-RG-1402G-W	128 шт.
Кроссовый шкаф или стойка		1 шт.
Оптический распределитель- ный кросс ODF для стыка OLT и оптического кабеля		1 шт.

10.2. Расчет энергетического бюджета мощности и затухания при проектировании сетей PON

Расчет энергетического бюджета мощности в сетях PON

Каждый компонент оптического линейного тракта PON имеет свою величину оптических потерь. Допустимые потери оптического сигнала на всем пути от оптического передатчика до приемника не должны превысить энергетический бюджет мощности. Оптический бюджет (ОВ – Optical Budget) приемопередающего оборудования, измеряемый в дБ, определяется как интервал [ОВ_{min}, ОВ_{max}] по формулам:

$$OB_{\max} = p_{out_min} - p_{in_min} ; \quad (10.1)$$

$$OB_{\min} = p_{out_max} - p_{in_max} , \quad (10.2)$$

где p_{out_min} , p_{out_max} – допустимый разброс мощностей передатчиков OLT и ONU/ONT;

- p_{in_min} , p_{in_max} – допустимый уровень принимаемого сигнала на приемниках OLT и ONU/ONT, при котором коэффициент ошибок (BER) не превышает заданный уровень.

Необходимо отметить, что значения p_{out_min} , p_{out_max} , p_{in_min} , p_{in_max} можно найти в техническом описании выбранного оборудования OLT и ONU/ONT, где указаны характеристики и классы по затуханию используемых приемопередатчиков/трансиверов (табл. 10.3).

Классы приемо-передатчиков OLT и ONU/ONT

Класс по затуханию	B+	C+	C++
Рабочая длина волны	Tx: 1490 нм Rx: 1310 нм	Tx: 1490 нм Rx: 1310 нм	Tx: 1490 нм Rx: 1310 нм
Форм-фактор	SFP	SFP	SFP
Скорость портов	Tx: 2,488 Гб/с Rx: 1,244 Гб/с	Tx: 2,488 Гб/с Rx: 1,244 Гб/с	Tx: 2,488 Гб/с Rx: 1,244 Гб/с
Мин. выходная мощность	1,50 дБм	3,00 дБм	7,00 дБм
Макс. выходная мощность	5,00 дБм	7,00 дБм	9,00 дБм
Мин. чувствительность приемника	-28,00 дБм	-32,00 дБм	-34,00 дБм
Тип коннектора	SC/PC	SC/PC	SC/PC
Тип поддерживаемых волокон	Одномодовое	Одномодовое	Одномодовое
Дальность работы	20 км	20 км	20 км
Макс перегрузка	-8,0 дБм	-12,0 дБм	-12,0 дБм
Коэфф. затухания	8,2 дБ	8,2 дБ	1,2 дБ

Расчет энергетического бюджета затухания в сетях PON

При расчете бюджета затухания/потерь руководствуются следующими условиями:

- волоконно-оптический канал PON удовлетворяет заданному бюджету, если потери мощности сигнала в канале PON (затухание в ОВ, потери на коннекторах, ОР и других компонентах) с учетом допустимых искажений сигналов, попадают в интервал [ОВ_{min}, ОВ_{max}];
- расчеты затухания оптического сигнала выполняются для оптической линии от точки подключения ОВ на активном оборудовании (на передатчике OLT) до **самого удаленного абонента** (на приемнике ONU/ONT).

При этом в PON источниками потерь являются:

- полное затухание в ОВ – зависит от его длины и коэффициента затухания ОВ на определенной длине волны, *то есть рассчитывается на длинах волн 1310 и 1490 нм;*
- полные потери в сростках сварных соединений – зависят от потерь в каждом сростке и их общего количества;
- полные потери в механических соединениях – зависят от потерь в каждом соединении и их общего количества;
- полные потери в «контактах» разъемных соединений – зависят от потерь в каждом соединителе и их общего количества;
- потери в разветвителях (сплиттерах) ОВ – зависят от коэффициента разветвления сплиттера (количества его портов);
- штрафные потери – это потери на изгибы ВОК при прокладке.

Сумма всех потерь, возникающих на участке PON, представляет собой энергетический бюджет затухания (Loss). При расчетах необходимо учитывать технологический запас для дополнительных сростков и вставок при проведении ремонтных работ, а также запас на естественное старение ОВ. В целом рекомендуется оставлять запас бюджета мощности в 3 дБ после полностью выполненного подключения всего тракта от стационарного порта OLT вплоть до абонентского ONU/ONT в квартире. Ширина диапазона допустимого ослабления сигнала в сети для оборудования любого класса составляет 15 дБ. Ширина диапазона допустимого затухания сигнала определяется адаптационными возможностями детекторов или шириной их рабочих диапазонов. Максимальный разброс потерь по оптическим путям сети не может превысить 15 дБ. Этот критерий удобен при проектировании сети, так как позволяет отвлечься от абсолютных уровней принимаемой мощности и свободно строить сеть. По окончании расчета остается лишь выбрать подходящий класс приемопередатчиков, либо использовать аттенуатор для приведения полученных потерь по оптическим путям сети в требуемый интервал.

Для каждого канала OLT-ONT_i ($i=1...N$, где N – число абонентских окончаний) можно описать условия на потери в прямом (downstream) и обратном (upstream) потоках:

$$\begin{aligned} OB_{d_min} &\leq \alpha_d \cdot L_i + \sum a_{splitter} + \sum a_{connect} + \sum a_{fusion} + \sum a_{WDM} \leq \\ &\leq OB_{d_max} - a_{pen_d} - \xi \end{aligned} \quad ; \quad (10.3)$$

$$\begin{aligned} OB_{u_min} &\leq \alpha_u \cdot L_i + \sum a_{splitter} + \sum a_{connect} + \sum a_{fusion} + \sum a_{WDM} \leq \\ &\leq OB_{u_max} - a_{pen_u} - \xi \end{aligned} \quad , \quad (10.4)$$

где L_i – длина i -го канала, км;

α_d и α_u – удельное затухание в ОВ на длине волны прямого и обратного потоков, дБ;

$\sum a_{splitter}$ – вносимые потери всеми оптическими сплиттерами в i -м канале, дБ;

Теоретические потери, вносимые равномерным оптическим сплиттером, вычисляются по формуле:

$$a_{splitter} = 10 \lg(N), \quad (10.5)$$

где N – число ответвлений сплиттера;

$\sum a_{connect}$ – потери на всех коннекторах (разъемных соединениях) в i -м канале, дБ;

$\sum a_{fusion}$ – потери на всех неразъемных сварных соединениях в i -м канале, дБ;

$\sum a_{WDM}$ – ослабление сигнала на WDM мультиплексоре (если передается CATV), дБ;

a_{pen_d} – штраф (penalty) – затухание сигнала из-за деградации волокна/компонентов, влияния внешних условий, искажения формы сигнала из-за хроматической и поляризационной модовой дисперсии, дБ. Оценивается в 1 дБ;

ξ – технологический запас в виде дополнительных сростков и вставок при проведении ремонтных работ, дБ. Оценивается в 3 дБ.

Для сетей с использованием оптических сплиттеров с малым количеством портов (количеством абонентов на один порт OLT) может потребоваться принудительное ослабление сигнала аттенюатором. У приемного детектора, кроме минимальной чувствительности pin_min , существует и верхняя граница рабочего режима pin_max , которая называется порогом перегрузки (minimum overload). При более мощном сигнале детектор уже не может принимать сигнал с требуемым для рабочего режима уровнем ошибок $BER = 10^{-10}$, так как выходит в режим насыщения.

Еще раз отметим, что для расчета энергетического бюджета по затуханию достаточно рассчитать затухания сигнала в одном канале от OLT до самого дальнего абонента ONU/ONT.

11. СЕТИ PON НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ NG-PON2 (ITU-T G.989)

В октябре 2015 года Международный Союз Электросвязи обнародовал рекомендацию ITU-T G.989, описывающую технологию NG-PON2 (Next Generation PON2), которая, в свою очередь, согласно постоянно растающим потребностям в увеличении полосы пропускания на абонента, позволяет обеспечить суммарную скорость передачи данных до 40 Гб/с, а в симметричном режиме – до 10 Гб/с.

11.1. Архитектура. Возможности и преимущества NG-PON2

Стандарт ITU-T G.989 (далее – NG-PO2) позволяет объединять сети с несколькими службами в единую оптическую распределительную сеть (ODN – Optical Distribution Network). Это приводит к значительному снижению совокупной стоимости владения, в то же время, позволяя внедрять новые эффективные архитектуры, которые глубоко адаптированы к новым потребностям абонентов.

Рис. 11.1 показывает основные блоки NG-PON2. Они включают:

- Optical Line Terminals (OLT) – линейные карты OLT, которые поддерживают совместимые планы длин волн. Линейные карты предоставляют подключаемые приемопередатчики, специфичные для длин волн ($\lambda_1 \dots \lambda_4$);
- Optical Networking Units (ONU) – абонентские терминалы с перестраиваемыми (tunable) лазерами, фильтрами и приемниками для поддержки совместимых планов длин волн, что обеспечивает их мобильность;
- Wavelength Multiplexer (WM1) – волновой мультиплексор MUX с пассивной длиной волны, который объединяет 4 длины волны ($\lambda_1 \dots \lambda_4$) NG-PON2 в одном волокне (в будущем $\lambda_1 \dots \lambda_8$, как показано на рис.11.2);
- Coexistence Element (CE) – представляет собой устройство MUX с пассивной длиной волны, которое объединяет большинство технологий доступа в одном волокне.

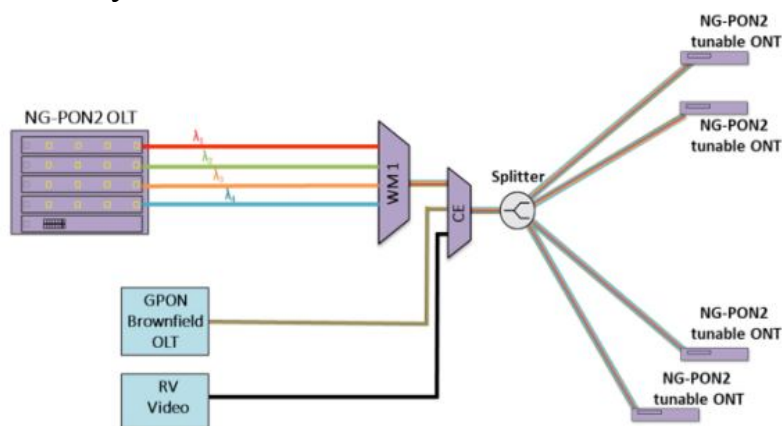


Рис. 11.1. Структурная схема NG-PON2

Системные требования NG-PON2 включают в себя поддержку:

- многоканальной TWDM-архитектуры;
- 4-8 пар каналов TWDM, настраиваемых для прироста, начиная с одной развернутой пары каналов в восходящем и нисходящем потоках (то есть НЕ ВСЕ пары каналов должны быть активны). Это позволяет абоненту платить только за используемые каналы TWDM, заполняющие OLT;
- максимальной дальности действия до 60 км;
- поддержки коэффициента разветвления до 1: 256;
- нижней и верхней скоростей номинальной линии на канал:
 - 10 Гбит/с в нисходящем направлении и 10 Гбит/с в прямом канале;
 - 10 Гбит/с в нисходящем направлении и 2,5 Гбит/с в прямом направлении;
 - 2,5 Гбит/с в нисходящем направлении и 2,5 Гбит/с в прямом направлении.

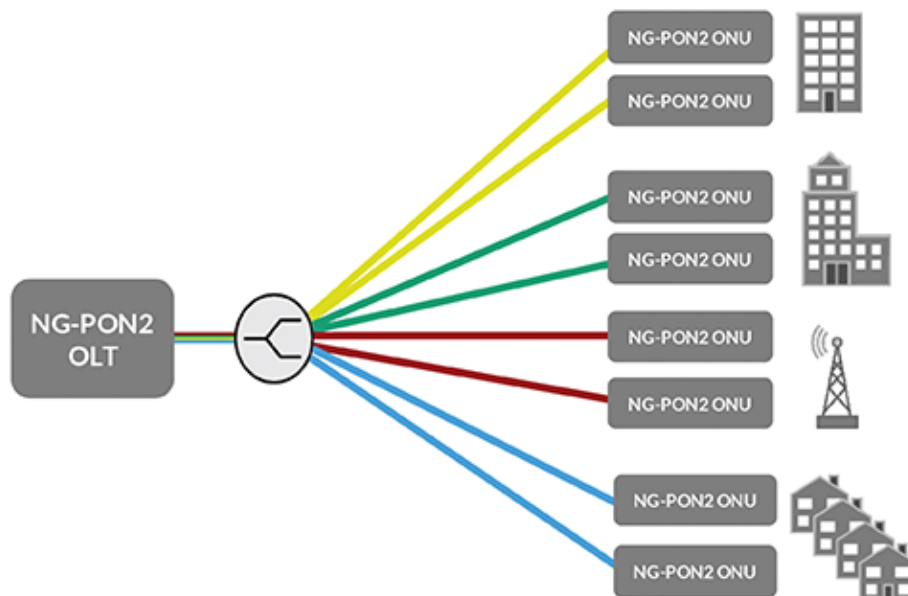


Рис.11.2. Структурная схема NG-PON2 для восьми длин волн ($\lambda_1 \dots \lambda_8$)

Системы NG-PON2 могут поддерживать следующие режимы работы:

- пропускную способность до 40 Гбит/с в нисходящем и до 10 Гбит/с в восходящем потоке, при дальности действия до 20 км, с коэффициентом разветвления не менее 1:64;
- пропускную способность 2,5 Гбит/с в нисходящем и 2,5 Гбит/с в восходящем потоке, при дальности действия до 40 км, с коэффициентом разветвления не менее 1:32;
- пропускную способность 10 Гбит/с в нисходящем и 10 Гбит/с в восходящем потоке, при дальности действия до 40 км, с коэффициентом разветвления не менее 1:32;
- перестраиваемый двухточечный WDM с возможностью совместного использования с другими системами PON.

Основные возможности технологии NG-PON2:

- обеспечение гибкости полосы пропускания;
- поддержка модели «оплата по мере роста», которая позволяет поставщикам услуг добавлять больше длин волн по мере необходимости;
- поддержка бесшовных обновлений сервиса с использованием перестраиваемой оптики;
- поддержка канальных пар длин волн со скоростями до 40/40 Гбит/с (до 80/80 Гбит/с в будущем);
- поддержка «разделения волокон», что позволяет поставщикам услуг назначать длины волн;
- предоставление конвергентной сети, которая обеспечивает поддержку любых услуг, включая: бизнес - услуги, транспортные и бытовые услуги.

Преимущества технологии NG-PON2:

- обеспечение симметричной скорости линии от 10 Гбит/с на одну длину волны, до 8 длин волн в ODN;
- поддержка четырех длин волн в первоначальном релизе, при этом стандарт обеспечивает возможность перехода на восемь длин волн;
- поддержка совместимости с технологиями GPON и XGS-PON/XG-PON1;
- поддержка перестраиваемой оптики, которая обеспечивает мобильность по длине волны;
- возможность изменения пропускной способности по требованию.

11.2. Основные характеристики NG-PON2. Области применения

Ключевой особенностью NG-PON2 является возможность настройки передатчика и приемника ONU/ONT. В нисходящем направлении от OLT к ONU/ONT требуется перестраиваемый приемник ONU/ONT для выбора соответствующего канала длины волны. В восходящем направлении от ONU/ONT к OLT передатчик ONU/ONT настроен на излучение в желаемом канале длины волны. Есть две характеристики перестраиваемого передатчика/приемника: управление каналом и управление длиной волны. Для управления длиной волны допускаются два типа механизмов: один требует взаимодействия OLT и ONU/ONT для управления длиной волны; другой требует, чтобы ONU/ONT полностью контролировал длину волны.

Мобильность по длине волны

Мобильность по длине волны позволяет ONU/ONT видеть все длины волн в оптической распределительной сети и дает возможность использовать перестраиваемую оптику в ONU/ONT для настройки на любую из доступных длин волн. Мобильность по длине волны позволяет поставщи-

кам услуг создавать правила, которые определяют, как ONU/ONT могут перераспределяться между конечными устройствами пользователей для целей обслуживания в PON. Это обеспечивает следующие возможности:

- инкрементное обновление полосы пропускания (Pay-as-you-Grow);
- избыточность – в случае сбоя ONU/ONT переключится на подготовленную линейную карту в режиме горячего резерва;
- балансировка нагрузки – обеспечивает возможность управления пиками трафика в зонах обслуживания;
- регулировка коэффициента разделения – ONU/ONT могут быть предоставлены для перемещения на другую длину волны, эффективно уменьшая коэффициент разделения на одной длине волны и увеличивая коэффициент на другой длине волны;
- функции защиты используют другую длину волны для защиты в качестве аварийного переключения;
- бесперебойная работа по техническому обслуживанию и модернизации – ONU/ONT могут быть предоставлены для перехода на другую длину волны в другой системе во время обслуживания и модернизации;
- связывание каналов – поскольку в ODN существует несколько длин волн, можно создать ONU/ONT, чтобы обеспечить пропускную способность более 10 Гбит/с.

Канал связи

Связывание каналов дает возможность использовать несколько длин волн, поддерживаемых в ODN, для увеличения пропускной способности ONU/ONT. Например, если бизнесу требуется обеспечить истинную пропускную способность 10 Гбит/с, поставщику услуг потребуется предоставить более 10 Гбит/с для достижения требуемой пропускной способности. Это может быть достигнуто путем доставки двух длин волн к одному ONU/ONT.

Конвергенция услуг

Используя несколько длин волн, NG-PON2 дает поставщикам услуг возможность поддерживать конвергенцию услуг, помещая все их услуги в общую ODN. Это позволяет поставщикам услуг разделить мобильные, коммерческие и бытовые услуги на разных длины волн, одновременно предоставляя их разным OLT, а также снизить затраты на обслуживание и эксплуатацию благодаря обслуживанию OB или компонентов WDM для отдельных сервисов.

Мультиволновые эталонные точки системы

В системе NG-PON2 OLT концептуально состоит из множества оконечных соединений (CT), объединенных через мультиплексор длины волн

ны (WM). Соответствующая эталонная логическая архитектура и ее эталонные точки представлены на рис.11.3.

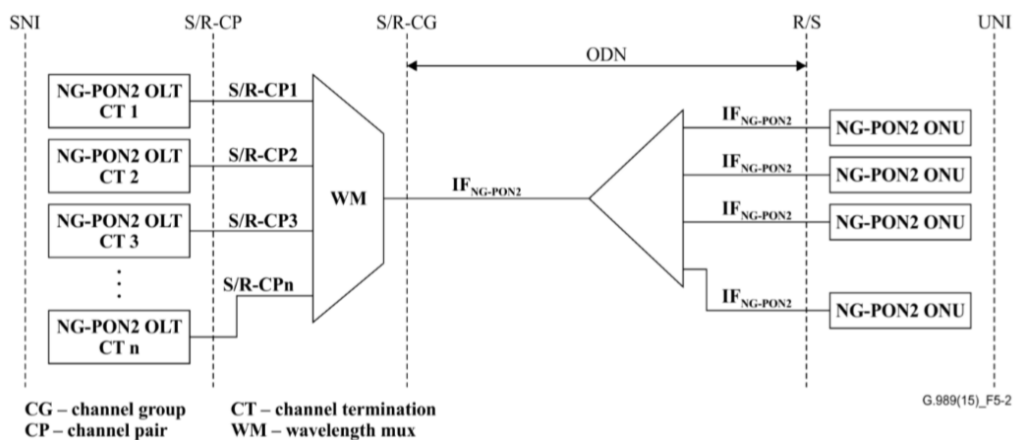


Рис. 11.3. Эталонная логическая архитектура NG-PON2

Контрольные точки определены ниже:

- S: интерфейс отправки в сеть;
- R: интерфейс получения от сети;
- S/R, R/S: комбинация точек S и R, существующих одновременно в одном волокне, при работе в двунаправленном режиме. Точка S/R привязана к стороне OLT, точка R/S - к стороне ONU/ONT.

Два направления оптической передачи в ODN обозначены стандартным образом: нисходящее направление для сигналов, проходящих от OLT к ONU/ONT; а также восходящее направление для сигналов, проходящих от ONU/ONT к OLT.

Передача в нисходящем и восходящем направлениях происходит в ODN через одно и то же волокно и компоненты (дуплексная/дуплексная конфигурация).

Основной метод спецификации оптических параметров относится к точке S/R для группы каналов (эталонная точка S/R-CG на рис.11.2) для отдельных каналов с длиной волны). Альтернативный метод применим в ситуациях, когда первичная контрольная точка, S/R-CG, непрактична или недоступна для выполнения измерений, либо желательно предоставить простую спецификацию чувствительности поставщику приемопередатчика OLT.

Каждый ONU/ONT оснащен перестраиваемым передатчиком и перестраиваемым приемником. Перестраиваемый передатчик ONU/ONT должен иметь возможность настраиваться на выделенные каналы длины волны TWDM или PtP WDM восходящего потока в диапазонах, указанных в табл. 11.1. Перестраиваемый приемник ONU/ONT должен иметь возможность настраиваться на выделенные нисходящие каналы с длиной волны TWDM или PtP WDM в полосах, указанных в табл.11.1. Поддерживается

минимум четыре канала PtP WDM, причем максимум не указан. Число каналов длины волны, поддерживаемых данной реализацией оборудования или экземпляром сети, не указано; однако следует обращаться к таблицам оптических параметров для конкретных допущений, сделанных для данных параметров.

Архитектура может быть расширена для поддержки нескольких OLT в общей ODN для других целей, таких как развертывание по мере роста и гибкость спектра.

Таблица 11.1

Диапазоны длин волн для технологий NG-PON2

Длина волны. Совместимые системы	TWDM PON		PtP WDM PON
	Downstream	Upstream	Upstream/Downstream
GPON, RF video, XG-PON1	1596-1603 нм	Широкополосный вариант 1524-1544 нм Опция уменьшенной полосы 1528-1540 нм Вариант узкой поло- сы 1532-1540 нм	Расширенный спектр 1524-1625 нм Общий спектр 1603-1625 нм

Динамический диапазон, чувствительность и перегрузка

Концепция определения динамического диапазона показана на рис. 11.4. Наблюдаемые значения чувствительности и перегрузки приемника могут изменяться при изменении рабочей температуры и качества сигнала, а также по мере старения и деградации системы связи. Характеристики качества сигнала, которые влияют на чувствительность и перегрузку приемника, включают в себя: коэффициент затухания передатчика, параметры глаз-диаграммы, перекрестные помехи в полосе. В настоящее время чувствительность и перегрузка приемника формально определяются их соответствующими значениями наихудшего случая, то есть максимальной чувствительностью и минимальной перегрузкой в диапазоне рабочих температур и параметров качества сигнала, а также в условиях истечения срока службы.

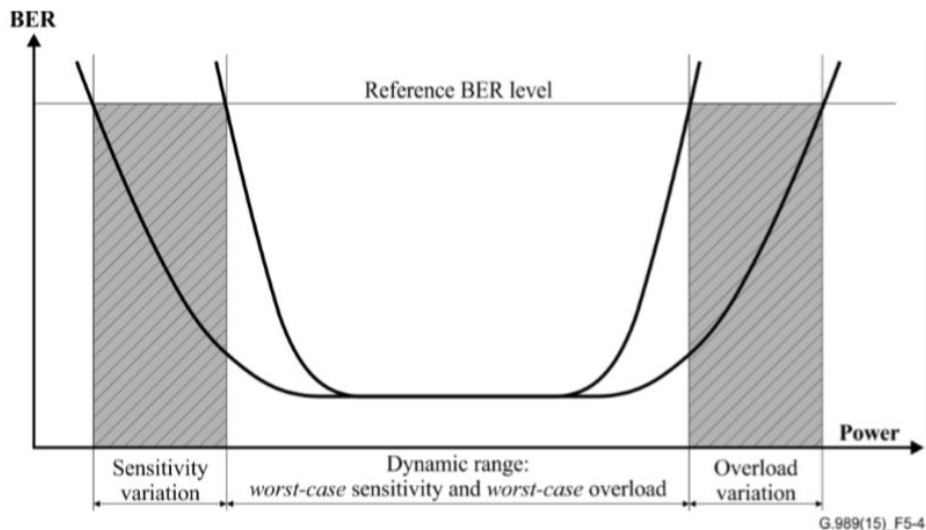


Рис. 11.4. Выходной BER как функция принятой оптической мощности и определение динамического диапазона

Области применения NG-PON2

Изменения в телекоммуникационной отрасли обусловлены быстро меняющимися требованиями рынка связи и растущими ожиданиями абонентов. NG-PON2 набирает обороты по всему миру. На сегодняшний день NG-PON2 развернут в сетях реального времени компаниями Verizon, SK Broadband, Portugal Telecom, Northpower Fibre) и несколькими другими поставщиками услуг по всему миру. Благодаря использованию технологии NG-PON2 и возможности объединения сервисных сетей в одну ODN, значительно снижается совокупная стоимость владения.

На рис. 11.5 показано, как поставщики услуг могут объединить свои деловые, бытовые и мобильные услуги в общую ODN, используя NG-PON2.

Благодаря поддержке перестраиваемых ONU/ONT, NG-PON2 предоставляет провайдерам услуг связи возможность виртуального перемещения ONU/ONT в зоне обслуживания для обеспечения балансировки нагрузки. Как показано на рис.11.5, несколько λ -подсетей NG-PON2 совместно используют одну ODN с помощью мультиплексирования с волновым разделением каналов (WDM). Каждая длина волны NG-PON2 может работать независимо или объединена посредством связывания длин волн с PON с высокой пропускной способностью (до 80 Гбит/с в нисходящем и восходящем потоках). Подобная гибкая архитектура позволяет поставщикам услуг переходить к конвергентной ODN, что позволяет использовать разные приложения в одном и том же волокне.

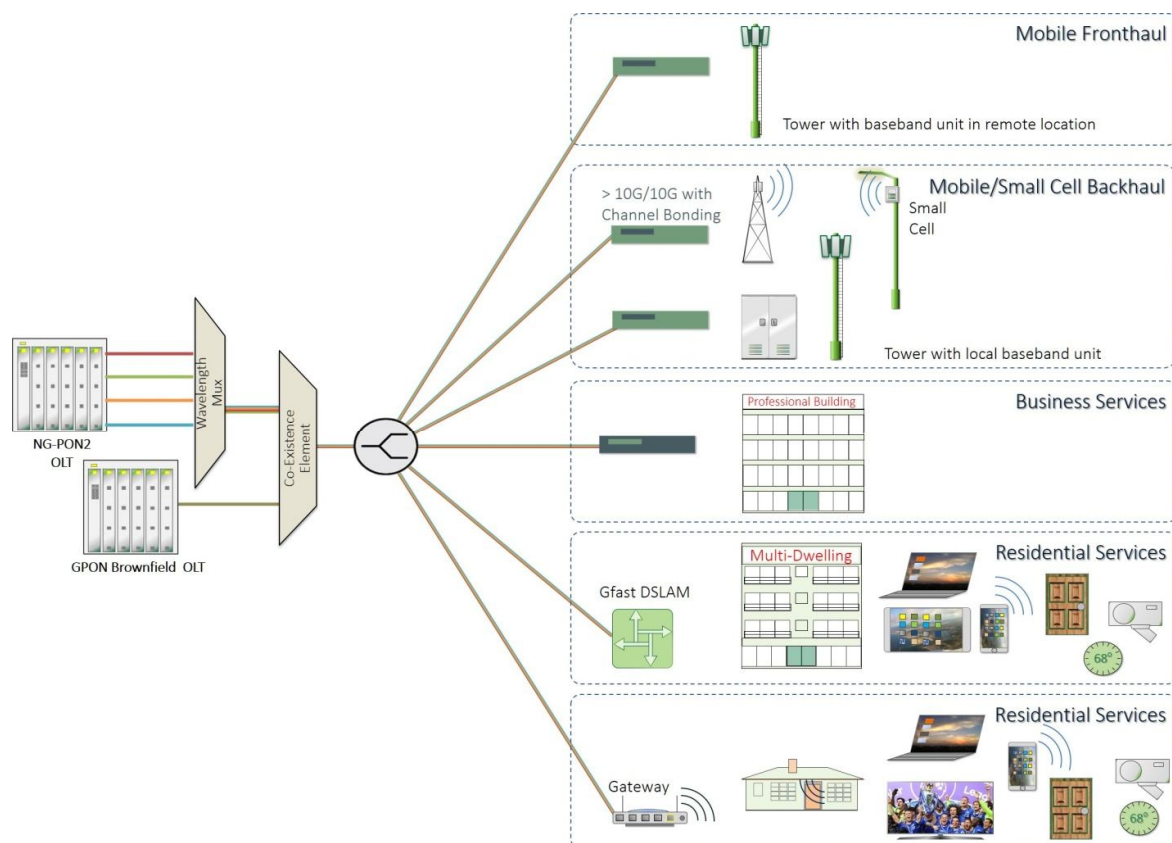


Рис. 11.5. Варианты реализации NG-PON2

Проблемы при развертывании сетей NG-PON2

Как и в любой другой сети, работа используемого в сетях PON оборудования должна соответствовать определенным стандартам. Эти стандарты устанавливаются группами ITU-T и IEEE и, в случае с ITU-T, определяют функционирование GPON, XGS-PON и NG-PON2. По большей части GPON – это то, что используется сегодня. Но текущие стандарты GPON и IEEE EPON не позволяют расширять количество абонентов или увеличивать пропускную способность для удовлетворения требования конечного пользователя.

Следующие шаги будут включать в себя увеличение пропускной способности и формирование симметричности. Текущие сети GPON обеспечивают скорость передачи данных в 2,4 Гбит/с для нисходящего канала и 1,2 Гбит/с для восходящего канала. Для удовлетворения требований высокой пропускной способности в сетях NG-PON2 был установлен стандарт ITU-T G.989. Был выбран метод мультиплексирования с разделением по времени и длине волны (TWDM), который объединил несколько длин волн в нисходящем и восходящем направлениях передачи. Это позволяет увеличить общую пропускную способность до 40 Гбит/с для нисходящего канала и до 10 Гбит/с для восходящего канала с использованием четырех каналов/длин волн со скоростью 10/2,5 Гбит/с.

При развертывании сетей PON практически 70% всех инвестиций приходится на ODN. Поэтому для развития NG-PON2 важно обеспечить совместимость с уже развернутыми сетями, такими как GPON. Для использования нескольких длин волн в сетях NG-PON2 необходимо, чтобы терминалы оптических сетей (ONT) на стороне клиента имели настраиваемые трансиверы. В настоящее время недорогие перестраиваемые приемники пока еще недоступны, поэтому многие операторы перед переходом на NG-PON2 предполагают использовать промежуточный шаг в виде XGS-PON. В XGS-PON используются не такие дорогие стационарные лазеры и приемники диапазона C-Band и, следовательно, такой шаг экономически обоснован.

Для физического внедрения перехода или активации новых услуг PON требуется внести изменения в сеть, особенно на стационарном участке. Для использования существующих сетей ODN необходим элемент со-существования. Он может иметь разные конфигурации в зависимости от того, какие технологии развертывает поставщик услуг. По сути, это пассивный оптический соединитель для объединения восходящего и нисходящего каналов служб GPON, XGS-PON и NG-PON2.

Передача с использованием нового стандарта NG-PON2 позволяет поставщикам услуг увеличить пропускную способность сетей FTTH и снизить затраты на развертывание путем совместного использования одного и того же волокна большим количеством подключенных клиентов или даже путем совместного использования сетей несколькими операторами. Новый стандарт NG-PON2, использующий длины волн передачи в диапазоне 1535 нм для восходящего канала и в диапазоне 1600 нм для нисходящего канала, дает возможность получить больше от того же волокна и позволяет свободно накладывать новые службы на существующие сети GPON.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конкуренция на рынке телекоммуникаций, расширение набора услуг и требования приложений стимулируют потребности в сетях широкополосного абонентского доступа (ШПАД). Современные услуги и сервисы предъявляют все более высокие требования к пропускной способности, вследствие чего потребности в увеличении скорости передачи на сетях доступа непрерывно растут. Рост требований услуг и сервисов к увеличению пропускной способности сетей доступа при ограниченных возможностях технологий, использующих в качестве среды передачи медный кабель, ориентируют операторов связи к полноценному переходу на оптические технологии, которые позволяют предоставлять абоненту качественный пакет инфокоммуникационных услуг (Triple Play) и с каждым днем становятся все более доступными. Инвестиции в инфраструктуру широкополосных сетей абонентского доступа следует рассматривать как долгосрочные.

При подготовке специалистов по направлениям «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», «Фотоника и оптоинформатика» важное место занимают вопросы выбора наиболее целесообразных технико-инженерных вариантов технологий, подбора оборудования, а также проектирования, строительства, проведения комплексных измерений для сетей абонентского доступа. При этом необходимо стремиться к получению максимального эффекта при минимуме затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T Recommendation G.984.1. Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): General Characteristics. ITU-T, Geneva, Switzerland – 2008.
2. ITU-T Recommendation G.984.2. Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification. ITU -T, Geneva, Switzerland – 2019.
3. ITU-T Recommendation G.984.3. Gigabit-Capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification. ITU-T, Geneva, Switzerland – 2014.
4. IEEE Standard 802.3ah. CSMA/CD access method and physical layer specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. IEEE – 2004.
5. IEEE Standard 802.3av. CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks. IEEE – 2009.
6. ITU-T Recommendation G.989. 40-Gigabit-capable Passive Optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms. ITU-T, Geneva, Switzerland – 2015.
7. Горнак, А. Новые горизонты PON / А. Горнак // Технологии и средства связи. – 2009. – № 4.
8. Пассивные оптические сети PON. Часть 1. Архитектура и стандарты // Lightwave, 2004. – № 1.
9. Соколов, Н.А. Сети абонентского доступа. Принципы построения / Н.А. Соколов. – Пермь, «Энтер-Профи», 1999. – 199 с.
10. Требования к комплексу Работ, включая передаваемое (предоставляемое) оборудование OLT, вспомогательное оборудование, необходимых для реализации проекта «Строительства сетей ШПД по технологии GPON в ОАО «Ростелеком» в 2013 году». – Санкт-Петербург : ОАО «Ростелеком», 2013.
11. Kramer, G. Ethernet passive optical networks / G. Kramer // New York : McGraw-Hill – 2005. – 308 p.
12. Kramer, G. Evolution of Optical Access Networks: Architectures and Capacity Upgrades / G. Kramer, M. De Andrade, R. Roy, P. Chowdhury // Proceedings of the IEEE – 2012. – vol. 100 – pp. 1188-1196.
13. Luo, Y. Time-and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2) / Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma // Journal of Lightwave Technology – 2013 – vol. 31, pp. 587-593.
14. Zhengxuan, L. Experimental demonstration of a symmetric 40-Gb/s TWDM-PON / L. Zhengxuan, Y. Lilin, B. Meihua, L. Jun, H. Hao, Y. Xuelin, and H. Weisheng // Optical Fiber Communication Conference and Exposition

and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013 – 2013, pp. 1-3.

15. *Karamitsos, L.* Bandwidth Allocation DBA (BA-DBA) Algorithm for xPON Networks / L. Karamitsos // International Journal of Computer Applications – July 2012 – v.50 – pp. 42–46.

16. *Kramer, G.* Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time (IPACT): a Dynamic Bandwidth Distribution Scheme in an Optical Access Network / G. Kramer, B. Mukherjee, G. Pesavento // Photonic Network Communications. – 2002. – v. 4, № 1. – pp. 89–107.

17. *Lannoo, B.* Thorough analysis of the IPACT Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for EPONs / B. Lannoo, L. Verslegers, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester, M. Gagnaire // 4th International Conference on Broadband Communications, Networks and Systems Photonic, 2007, USA. Proceedings of the conference – 2010. – v.1-2. – pp. 486–494.

18. *Петренко, И. И.* Пассивные оптические сети PON / И. И. Петренко, Р. Р. Убайдуллаев // Фотон-Экспресс. – 2005. – № 1(41). – с. 14–18.

19. *Петренко, И. И.* Пассивные оптические сети PON. Часть 3. Проектирование оптимальных сетей / И. И. Петренко, Р. Р. Убайдуллаев // Lightwave Russian Edition. – 2004. – №3. – С. 21 – 28.

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

21. *Гаскевич, Е.* Оптические сети многоэтажного дома. Ключевые характеристики и определения для кабельной подсистемы // Технологии и средства связи. – 2010. – № 3.

22. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 1. – Теория передачи и влияния / В.А. Андреев, Э.Л. Портнов, Л.Н. Кочановский ; под редакцией В.А. Андреева. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 424 с.

23. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2. – Проектирование, строительство и техническая эксплуатация / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, Л.Н. Кочановский, Э.Л. Портнов, В. Б. Попов; Под редакцией В.А. Андреева. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 424 с.

Салтыков Антон Радиевич

ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ ДОСТУПА

Учебное пособие

Отпечатано с готового авторского оригинал-макета

План издания 2019 г., п. 64

Подписано к печати 26.12.2019
Объем 8,0 усл.-печ. л. Тираж 26 экз. Заказ 1060

Редакционно-издательский отдел СПбГУТ
193232 СПб., пр. Большевиков, 22

Отпечатано в СПбГУТ