

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Ю.А. Зингеренко
ПАССИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ ХРОН

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2020

Зингеренко Ю.А. Пассивные оптические сети xPON– СПб: Университет ИТМО, 2020. – 115 с.

Рецензент(ы):

Макаренко Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра светодиодной фотоники, Университета ИТМО.

В учебном пособии основное внимание уделено технологии TDM PON (EPON и GPON), рассмотрены основы ее функционирования на физическом уровне. Дается определение оптической сети доступа, приводится классификация сетей доступа по используемой архитектуре и технологии. Представлена стандартизация пассивной оптической сети с разделением по времени. Значительный раздел посвящен основным компонентам пассивной оптической сети и активному оборудованию, которое устанавливается на станции и у пользователя. Подробно описаны функционирование, технические возможности и параметры оптического сплиттера - главного элемента пассивной оптической сети распределения. В заключительных разделах приведено описание функционирования GPON на верхних уровнях, описываются измерения пассивной оптической сети на физическом уровне, рассматриваются процедуры технического обслуживания, контроля и защитного переключения в сетях PON.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2020
© Зингеренко Ю.А., 2020

Содержание

Введение	4
1. Оптическая сеть доступа. Основные положения	6
2. Стандартизация пассивной оптической	10
3. Основные компоненты пассивной оптической сети	15
3.1. Оптическое волокно	17
3.1.1. Типы оптических волокон.....	17
3.1.2. Распространение света по волокну	20
3.1.3. Характеристики поставляемых волокон	25
3.2. Пассивные оптические компоненты	30
3.2.1. Разъемные соединители.....	31
3.2.2. Оптический сплиттер.....	35
4. Оптоэлектронные компоненты PON	42
4.1. Передающие оптоэлектронные модули.....	42
4.2. Приемные оптоэлектронные модули.....	47
4.3. Оптические усилители	53
5. Технология PON	57
5.1. Планирование физического уровня пассивной оптической сети	57
5.2. Передача видеосигнала	60
5.3. Функционирование GPON	63
5.3.1. Основы функционирования GPON на физическом уровне	63
5.3.2. Основы функционирования GPON на верхних уровнях.....	71
6. Особенности энергетического баланса в последовательной цепочке ONU/Т технологической связи между двумя станциями OLT	83
6.1. Случай GPON	84
6.2. Случай CWDM	87
7. Измерения на физическом уровне PON	89
7.1. Оптические измерительные инструменты	90
7.1.1. Измерение затухания	90
7.1.2. Оптический измеритель мощности	91
7.2. Оптический рефлектометр	92
7.2.1. Оптический рефлектометр во временной области	92
7.2.2. Оптический рефлектометр в частотной области	95
7.3. Измерения в оптической сети распределения на этапе построения сети	96
8. Техническое обслуживание и контроль PON	96
8.1. Техническое обслуживание PON	99
8.2. Контроль PON	99
8.2.1. Контроль при помощи ожидаемых отражений	100
8.2.2. Контроль на основе выбора соединения.....	101
8.2.3. Контроль с разделением по длине волны	102
8.2.4. Контроль с использованием рефлектометрии	103
8.2.5. Контроль при помощи рефлектометрии в волновом пространстве.....	104
8.2.6. Контроль при помощи протокола управления.....	106
9. Защитное переключение	108
Контрольные вопросы	114
Литература	115

Введение

В современных сетях связи сеть доступа или абонентская сеть соединяет региональную опорную сеть с конечным пользователем, т. е. с домашней сетью пользователя. Пассивная оптическая сеть – это широкополосная система доступа, которая использует оптическое волокно для транспортирования и активное оборудование на стороне станции и конечных пользователей. Именно по этой причине данная технология представляется интересной большому числу операторов.

Соединение станции с конечными пользователями осуществляется с помощью транспортного оптоволоконного кабеля в обоих направлениях. Направление от станции к абоненту называется нисходящим направлением, а от абонента к станции – восходящим направлением. Поскольку в каждом направлении к одному волокну подключено большое число пользователей, требуется осуществить разделение как направлений передачи, так и сигналов отдельных пользователей. Разделение направлений передачи осуществляется на основе разделения по длине волны. Сигналы различных пользователей могут разделяться либо с помощью волнового уплотнения WDM, либо с помощью временного уплотнения TDM. Наибольшее распространение в силу большей простоты и меньшей стоимости получило разделение на основе временного уплотнения TDM PON, как наиболее экономически рациональное.

По этой причине в учебном пособии основное внимание уделено именно технологии TDM PON (EPON и GPON), рассмотрены основы ее функционирования на физическом уровне. В первых разделах книги дается определение оптической сети доступа, приводится классификация сетей доступа по используемой архитектуре и технологии. Далее представлена стандартизация пассивной оптической сети с разделением по времени. Значительный раздел посвящен основным компонентам пассивной оптической сети и активному оборудованию, которое устанавливается на станции и у пользователя. Здесь главным элементом пассивной оптической сети распределения является оптический сплиттер, функционирование которого, технические возможности и параметры описаны достаточно подробно.

В заключительных разделах приведено описание функционирования GPON на верхних уровнях, описываются измерения пассивной оптической сети на физическом уровне, рассматриваются процедуры технического обслуживания, контроля и защитного переключения в сетях PON.

Технологии GPON и EPON, которые рассмотрены здесь достаточно подробно, конечно, не являются окончательным вариантом в развитии оптических сетей. Оптическая сеть доступа будет и далее продолжать свою эволюцию до тех пор, пока будет сохраняться потребность в развивающемся широкополосном доступе. Еврокомиссия пытается стимулировать развитие в этой области посредством цифровой повестки EU 2020. Оптическая сеть в 2020 году должна обеспечить всем пользователям возможность подключения со скоростью 30 Мбит/с и половине пользователей со скоростью не менее 100

Мбит/с. В более долгосрочной перспективе для реализации наиболее комплексных услуг понадобится реализация соединения на скорости в пределах от 100 до 1000 Мбит/с. Учитывая столь высокую скорость соединения, потребуется применение комбинированной технологии TDM/WDM, элементы реализации которой на отдельных сетях имеют место уже в настоящее время.

Оптическая абонентская сеть представляет собой объект экономического и социального значения. Она является инфраструктурным объектом национального интереса и как техническая основа информационного общества играет важнейшую роль в развитии образования, науки, здравоохранения, муниципального и государственного управления, торговли, предпринимательства, организации досуга и т. д.

Рекомендовано к использованию в университете ИТМО по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика по дисциплине «Сети связи и системы коммутации» в качестве учебного пособия для основных профессиональных образовательных программ Высшего образования магистратуры (16 часов лекции, 16 часов практических занятий, 76 часов самостоятельной работы).

1. Оптическая сеть доступа. Основные положения

В современных сетях связи сеть доступа представляет соединительную часть между региональной опорной сетью и конечным пользователем т. е. является для него домашней сетью (рис 1). К сети доступа относится также Metro-сеть.

Опорные (магистральные) сети строятся на основе оптического волокна и используют технологию SDH синхронной цифровой иерархии либо технологию разделения по длинам волн WDM. С технической точки зрения опорная сеть должна быть очень надежной, поскольку через нее передается очень большой объем информации. Следовательно, экономически опорная сеть может иметь более высокую стоимость по сравнению с остальными частями сети связи, так как затраты на строительство (капитальные затраты) и эксплуатационные расходы распределяются между большим числом пользователей.



Рис 1. Сеть доступа в современной сети связи.

Сети доступа, предназначенные для подключения конечных пользователей, должны доходить до дома пользователя и обеспечивать передачу данных в его домашнюю сеть, которая становится все более мультимедийной. С развитием мультимедийных технологий на стороне конечного пользователя постоянно увеличивается потребность в скорости соединения, т. е. полосе пропускания, которая может быть обеспечена только широкополосными сетями. Определить минимально необходимую скорость соединения, которая определяется количеством переданных данных в единицу времени, невозможно в силу постоянного увеличения потребностей конечного пользователя. Поэтому требуемую широкополосность сети доступа рациональнее определять на основе пользовательского восприятия, которое требует постоянного подключения к сети и быстрого реагирования при использовании мультимедийными приложениями (сеть с малыми задержками).

Сети доступа могут базироваться на различных технологиях – проводных и беспроводных. Самое широкое распространение получили электрические проводные решения на основе технологии цифровой абонентской линии (Digital Subscriber Line - DSL). DSL реализует технологическую модернизацию существующей телефонной сети. Однако она, к сожалению, имеет ограничения по радиусу действия и пропускной способности. По сравнению с медными

проводами оптическое волокно имеет целый ряд преимуществ, основными из которых являются скорость передачи и малая зависимость от расстояния.

Оптическое волокно обеспечивает полосу пропускания в несколько десятков ТГц. Благодаря этому оптоволокно является наиболее широкополосной средой передачи данных из всех известных. Оно имеет малое затухание, не имеющее по сравнению с магистральными сетями существенное значение в относительно небольших сетях доступа. Поскольку волокно является диэлектриком, оно не чувствительно к электромагнитным помехам (ударам молний и прочим сильнодействующим воздействиям). Исключены также перекрестные помехи между различными проводниками.

Существуют различные комбинации оптической и медной сети. В случае, когда волокно проложено до конечного пользователя, сетевой интерфейс называют оптическим сетевым терминалом (Optical Network Terminal - ONT). В остальных случаях, когда на конечном участке сети в направлении пользователя используется медная сеть, оптический интерфейс называется оптическим сетевым модулем (Optical Network Unit - ONU). Если тип оптического интерфейса не важен, используется аббревиатура ONU/T.

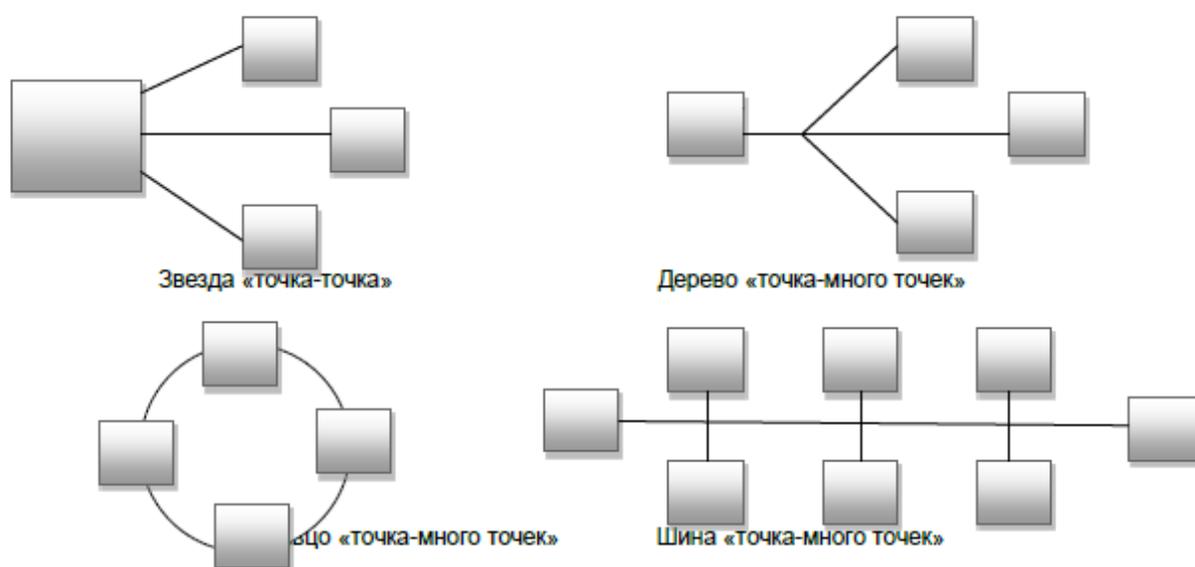


Рис 2. Типовые топологии оптической сети.

Оптическую сеть доступа, прокладываемую до жилища конечного пользователя или любой другой промежуточной точки, можно реализовать на основе различных топологий (рис 2). Соединение между станцией и пользователями можно обеспечить в рамках архитектуры типа «точка – точка» (Point-to-Point – P2P) или «точка-много точек» (Point to Multi Point – P2MP). В архитектуре P2P используется пассивная топология звезды, а в архитектуре P2MP – активная или пассивная топология дерева, кольца и шины. На практике топология кольца в сетях доступа не встречается, топология шины применяется в технологических сетях для обслуживания технологических магистралей типа железной дороги, нефти или газопровода.

Оптическая сеть доступа на практике встречается в двух конфигурациях. Первой архитектурной возможностью, которая появилась на начальном этапе развития, является P2P. При этом оптическая пассивная инфраструктура, т. е. оптическое волокно прокладывается от станции (Central Office- CE) до жилища пользователя. Каждому пользователю выделяется одно или одна пара оптических волокон. В доме каждого пользователя устанавливается приемопередающий модуль, называемый оптическим сетевым терминалом (Optical Network Terminal - ONT). На станции устанавливаются оптические линейные терминалы (Optical Line Terminal - OLT), причем каждому пользователю выделяется отдельный терминал. Количество приемопередающих устройств превышает количество пользователей вдвое. В ONT и OLT используются простые интерфейсы, обеспечивающие преобразование электрического интерфейса в оптический и обратно. Эта архитектура P2P стандартизована в ITU-T посредством Рекомендаций G.985 и G.986 для скоростей передачи 100 Мбит/с и 1 Гбит/с. К сожалению, для архитектуры P2P требуется большое количество волокон, занимающих много свободного места на станции и в кабельных шахтах. Основной ее недостаток – большие эксплуатационные затраты.

Второй возможностью при построении оптической сети доступа является архитектура P2MP. Из всех возможностей для организации оптической сети доступа операторам наиболее выгодна модель с пассивным кроссом, которая по сути и является пассивной оптической сетью PON, поскольку на участке между станцией и конечным пользователем не содержатся активные элементы. Пассивные сплиттеры, выполняющие функцию пассивного оптического кросса, обеспечивают низкие затраты, поскольку они могут быть установлены в любом месте, не требуют электропитания, надежны и долговечны. В случае PON часть затрат на построение сети делится между несколькими пользователями, поскольку между станцией и кроссом прокладывается только одно общее волокно длиной до 20 км. На станции используется только один приемопередатчик, предназначенный для обслуживания нескольких пользователей. Общее число устройств связи в отличие от P2P в этом случае минимально ($n+1$).

Общее волокно для всех пользователей требует тщательного планирования оборудования связи и алгоритмов его работы. Должен поддерживаться стандартизованный протокол связи, посредством которого обеспечивается использование одной среды передачи данных несколькими пользователями. Для минимизации затрат на техническое обслуживание и возможный ремонт операторы чаще всего используют только одно волокно из проложенной пары оптических волокон.

Совместное использование единого канала связи для многих пользователей может быть реализовано несколькими способами. Наиболее часто используется разделение во времени каналов передачи данных от каждого пользователя внутри отдельной длины волны передачи и применение разных (до трех) длин волн. Обычно в PON применяются три

стандартизованные длины волны (Рис 3). В нисходящем направлении (downstream) на длине волны 1490 нм выполняется широковещательная передача (broadcast) всем приемникам, причем отдельный приемник может принимать только предназначенный для него трафик. Трафик в восходящем направлении (upstream) передается по каналу передачи данных на длине волны 1310 нм, причем общее время связи делится в этом случае между всеми пользователями. Для назначения канальных интервалов отдельным пользователям используется оптический линейный терминал на станции. Третья длина волны 1550 нм зарезервирована для широковещательной передачи видео.



Рис 3. Распределение трафика по трем длинам волн в PON

Если рассмотреть различные способы разделения большого количества сигналов передаваемых по одному волокну, можно сделать вывод, что с технической точки зрения более сложной и дорогой является технология разделения по длинам волн (Wavelength Division Multiplexing - WDM), при которой каждому пользователю назначается сигнал со своей длиной волны для приема и, как правило, другой длиной волны для передачи. Это значит, что WDM PON работает как сеть типа «точка-точка» и поэтому обладает всеми ее свойствами. Эта технология требует применения большого числа работающих на разных длинах волн лазеров, что существенно ее удорожает. Поэтому WDM PON редко встречается на практике.

Возможна также гибридная реализация сети, т. е. комбинация разделения по длинам волн и по времени. При этом в нисходящем направлении с большей потребностью в полосе пропускания используется разделение по длинам волн, а в восходящем направлении – разделение по времени. Такое гибридное решение экономичнее решения, полностью построенного на технологии WDM.

Кроме разделения сигналов во времени (TIME Division Multiple Access - TDMA), и длинам волн (Wavelength Division Multiple Access -WDMA) в пассивных оптических сетях доступа имеются и другие возможности. Оптический множественный доступ может быть реализован посредством кодового разделения (Code-Division Multiple Access - CDMA) или посредством ортогонального частотного разделения (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM). Основная идея WDM в этих случаях заключается в разделении волновой полосы на множество очень узких полос частот (Ultra Dense WDM) с поддержкой когерентного детектирования.

2. Стандартизация пассивной оптической сети

Первые упоминания об оптической сети доступа на основе пассивной сети распределения с помощью оптических пассивных сплиттеров появились в 1987 году. Тогда компания British Telecom впервые представила возможность временного мультиплексирования телефонного трафика в оптической сети. После этого потребовалось еще десять лет, чтобы оптическая инфраструктура стала экономически рациональной и ее начали использовать в сетях доступа.

По мере развития оптических сетей доступа для внедрения технологии PON в реальную жизнь были необходимы международные стандарты. Стандартизацией технологии PON занимались две независимые рабочие группы, а позднее к ним присоединилась третья (Рис 4). Поскольку каждая из групп стандартизировала свой протокол связи, оборудование было несовместимо между собой.

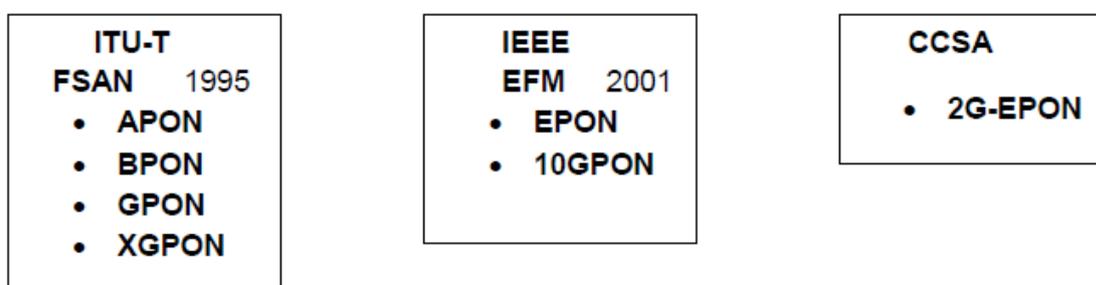


Рис 4. Организации по стандартизации PON

В 1995 году семь операторов связи организовали рабочую группу FSAN (Full Service Access Networks), основной задачей которой являлось развитие первой сети широкополосного доступа на основе оптической технологии. Позднее к этой группе присоединилось множество других операторов и производителей оборудования. Уже при создании первого стандарта сразу же появились требования к управлению трафиком и обеспечению качества обслуживания (Quality of Service - QoS). Поскольку в то время применялась только технология ATM (Asynchronous Transfer Mode), которая поддерживала оба этих требования, первый стандарт основывается на этой технологии и называется ATM PON или APON. APON обеспечивает скорость передачи 622,08 Мбит/с в нисходящем направлении на длине волны 1490 нм и 155,52 Мбит/с в восходящем направлении на длине волны 1310 нм. Для передачи видеосигнала предусмотрена длина волны 1550 нм, обеспечивающая наименьшее затухание, а также усиление светового сигнала с помощью оптических усилителей. Абонентский трафик здесь инкапсулируется в стандартные ячейки ATM, состоящие из заголовка длиной 5 байт и пользовательских данных длиной 48 байт. В 1998 году международный союз электросвязи ИТУ-Т принял стандарт APON в качестве Рекомендации G.983.1. Технология APON в то время предназначалась в основном для корпоративных клиентов, но вскоре была замещена более производительными технологиями BPON и GPON.

На основе стандарта APON исследовательская группа ITU-T позднее разработала стандарт BPON (Broadband PON), определенный Рекомендациями G.983. BPON по сравнению с APON имеет более высокую производительность и более точно определенный протокол. BPON в нисходящем направлении обеспечивает скорость передачи 1,24416 Гбит/с, а в восходящем – 622,08 Мбит/с. Рекомендации G.983 включают в себя такие расширенные функции, как динамическое распределение спектра (Dynamic Bandwidth Allocation - DBA), интерфейсы для управления и контроля, а также функции защиты сети.

Увеличение потребности в полосе пропускания в сети доступа стимулировало дальнейшее движение стандартов PON в сторону еще более высоких рабочих характеристик. В апреле 2001 года рабочая группа FSAN начала подготовку нового стандарта под названием «гигабитный PON» или GPON, определенный Рекомендациями ITU-T G.984. Зависимый от среды передачи физический уровень (Physical Media-Depended – PMD layer) GPON, определенный в стандарте G.984.2, в нисходящем направлении обеспечивает скорость передачи 2,48832 Гбит/с, а в восходящем направлении – 1,24416 Гбит/с. Конвергентный уровень передачи GTPON (GPON Transmission Convergence layer - GTC) определяет формат кадров GPON, доступ к общей среде передачи данных, процедуры функционирования и технического обслуживания, а также методики шифрования. На основании процедур базовой инкапсуляции в соответствии со стандартом ITU-T G.7041 была принята методика инкапсуляции GPON (GPON Encapsulation Method - GEM). GEM обеспечивает поддержку передачи данных в соответствии с различными протоколами второго уровня, такими как ATM и Ethernet. Базовая инкапсуляция GEM, также совместимая в обратном направлении с APON и BPON, обеспечивает более высокую эффективность, чем кадры Ethernet. Таким образом, BPON, как и GPON, оптимизированы для трафика TDM и базируются на инкапсуляции с очень строгими требованиями к синхронизации и точности выполнения.

Расширением стандарта G.984 являются PON с увеличенной дальностью действия (Reach Extension – RE) и большой дальностью действия (Long Reach – LR), описанные в Рекомендациях G.984.6 и G.984.7. Стандарт предусматривает увеличение дальности действия с помощью преобразования «оптика-электричество-оптика» (электрическая регенерация) или с помощью оптических усилителей (рис 5).

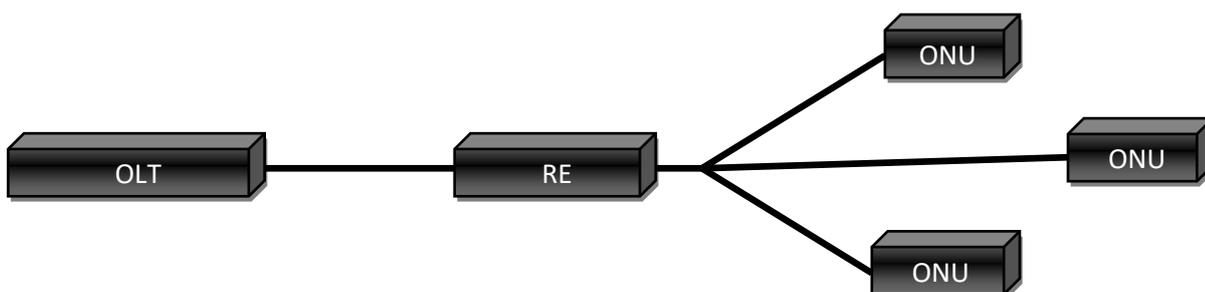


Рис 5. GPON с дальностью действия свыше 20 км

Основной целью принятия стандартов для увеличения сети является уменьшение числа станций для доступа на единицу площади охвата (консолидация сети), что ведет к снижению эксплуатационных затрат. Таким образом, стандарты RE и LR в большей степени подходят для сельской местности. Большая дальность действия PON обеспечивает создание резервных путей, которые длиннее имеющихся путей PON.

В январе 2001 года организация IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) учредила рабочую группу EFM (Ethernet in the First Mile), инициативу в которой имеют производители телекоммуникационного оборудования. В то время как организация ITU-T разрабатывала стандарты BPON и GPON, группа EFM разработала стандарт PON IEEE 802.3ah, который базируется на Ethernet и известен как EPON. Стандарт IEEE 802.3ah был принят в июне 2004 года и опередил GPON, благодаря чему он получил преимущество в применении на практике. Физический уровень EPON обеспечивает симметричную максимальную скорость 1,25 Гбит/с (эффективная скорость передачи 1,0 Гбит/с) в обоих направлениях. Стандарт 802.3 использует стандартный линейный код 8b/10b, обеспечивающий преобразование 8 бит данных в 10 линейных бит. Поскольку EPON работает на стандартной скорости Ethernet, появилась возможность использования имеющихся недорогих оптических компонентов Ethernet, что стало его существенным преимуществом. На самом деле EPON инкапсулирует и передает пользовательские данные в кадрах Ethernet. Таким образом, EPON является естественным расширением локальной сети конечного пользователя. То есть EPON соединяет локальную сеть Ethernet пользователя с опорной сетью, которая также базируется на Ethernet. Поскольку в EPON нет деления и обратного составления трафика, в стандарте определены менее строгие требования к функционированию. Таким образом, спецификации IEEE 802.3 не включают механизма DBA, классификации трафика, защиты сети и некоторых других расширенных функций. Отсутствие строгих требований в стандарте, к сожалению, понизило взаимодействие оборудования различных производителей, но обеспечило более низкую стоимость по сравнению с GPON. Ввиду частого использования Ethernet в локальных сетях пользователей технология EPON стала очень привлекательной технологией доступа. Наиболее широко она применяется в Японии и других странах Азии.

Третий процесс стандартизации ведется в Китае. Китайские производители оборудования и операторы связи принимали участие в разработке национального стандарта EPON в рамках CCSA (Chinese Communications Association). Нестрогие требования стандарта IEEE привели к слабому взаимодействию оборудования. Организация CCSA пытается устранить этот недостаток посредством подробных рекомендаций, в том числе и по тестированию оборудования PON. Основным преимуществом по сравнению с IEEE является увеличение скорости передачи до 2Гбит/с.

По причине постоянного увеличения потребности в полосе пропускания и последовательной модернизации PON обе рабочие группы, FSAN и EFM, уже

разработали стандарты для PON 10 Гбит/с, называемые NG-PON1. Такая модернизация учитывает многочисленные технические и экономические характеристики наряду с совместным использованием с предыдущими протоколами GPON и EPON в единой древовидной структуре PON. Организация IEEE в сентябре 2009 года издала стандарт IEEE 802.3av, также известный под названием 10GEPON, который совместим с предыдущей версией 802.3ah. Организация ITU-T издала серию рекомендаций для PON 10 Гбит/с, известных как XG-PON. В январе 2010 года изданы рекомендации G.987.1 и G.987.2, а в октябре 2010 года – G.987.3. Ожидается, что переход на 10 Гбит/с будет выполняться в два этапа. Переход на 10 Гбит/с сначала будет выполнен в нисходящем направлении, где потребности в полосе пропускания больше. И только на втором этапе будет произведен переход на симметричное решение, которое повлечет за собой использование более дорогого оборудования пользователя. Сосуществование GPON или EPON с системами 10 Гбит/с будет обеспечено путем выбора новых диапазонов длин волн (Рис 6). В системе со скоростью передачи 10 Гбит/с в нисходящем направлении используется длина волны 1577 нм, в то время как в предыдущих системах используется длина волны 1490 нм. Для предотвращения нежелательного влияния одного канала в нисходящем направлении на другой необходимо использовать оптические фильтры. Сосуществование технологий, конечно, будет легче реализовать там, где имеющиеся модемы уже оснащены блокирующим фильтром. В случае совместного использования симметричных систем восходящий трафик может передаваться на одной длине волны, причем OLT должен разделять скорость передаваемого трафика.

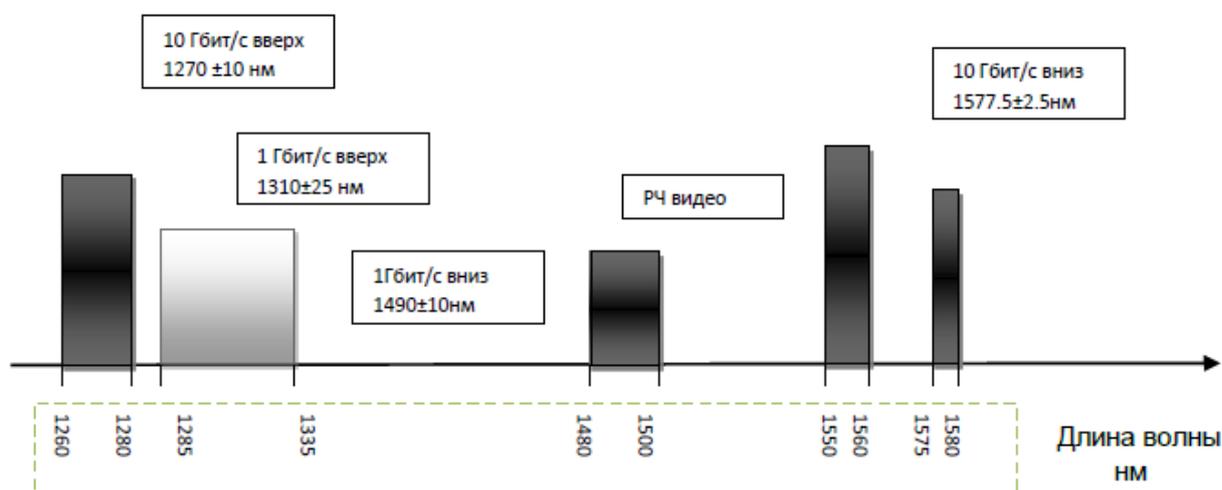


Рис 6. Распределение длин волн для GPON/EPON и 10 Гбит/с PON

Таким образом, стандарт IEEE, также как и ITU-T для NG-PON1, являются отличными примерами увеличения линейной скорости, которая согласно ожиданиям будет увеличиваться (40 Гбит/с и 100 Гбит/с) для систем NG-PON2. Для систем, предусматривающих скорость передачи свыше 10 Гбит/с, разрабатываются различные технологические решения, поэтому данные

системы еще не стандартизованы, кроме того неизвестно, являются ли они экономически целесообразными.

Тенденции развития GPON и EPON сходятся: увеличение дальности действия, увеличение коэффициента деления, увеличение скорости передачи и постепенное выравнивание скорости передачи в восходящем направлении со скоростью передачи в нисходящем направлении. Обе рабочие группы кроме увеличения линейной скорости также готовятся к стандартизации WDM PON. IEEE 10GEPON будет обеспечивать передачу данных на нескольких длинах волн в нисходящем направлении и на одной длине волны с TDMA в восходящем направлении. Организация ITU-T начала стандартизацию WDM с высокой плотностью (Ultra Dense WDM) с использованием когерентного детектирования.

Важную роль в формировании спецификаций PON играет некоммерческая организация Broadband Forum, представляющая собой объединение различных организаций в отрасли. Broadband Forum способствует продвижению решений путем подготовки спецификаций для широкополосных пакетных сетей, причем акцент делается на совместимости оборудования, архитектуре и управлении. В 2006 году в рамках форума был издан технический отчет TR-101: Next Generation Broadband Architecture, обеспечивающий возможность работы в сети TR-101. Технический отчет TR-156 содержит большое число правил и рекомендаций, рекомендуемых и нерекомендуемых решений для разработчиков сетей и операторов связи.

3. Основные компоненты пассивной оптической сети

Основной принцип пассивной оптической сети заключается в том, что между станцией (Central Office - CO) и пользователями используется как можно меньшее количество оптического волокна. Для такой реализации сети более всего подходит топология дерева.

Существенным преимуществом PON является отсутствие активных компонентов на пути передачи данных между станцией и пользователем (Рис 7). Эта часть сети называется оптической сетью распределения (Optical Distribution Network - ODN) и может достигать 20 км. Эта сеть состоит из пассивных оптических компонентов, таких как оптическое волокно, оптические соединители и сплиттер на удаленном узле (Remote Node - RN). Стандарт G.984.2 допускает возможность использование двух волокон на общем продолжительном участке в ODN, однако более практично использовать одно волокно с простым волновым разделением WDM.

Активное оборудование устанавливается только на стороне станции и пользователя, где кроме оптоэлектронного оборудования имеется также электронное оборудование, обеспечивающее правильное функционирование сети при помощи специального программного обеспечения.

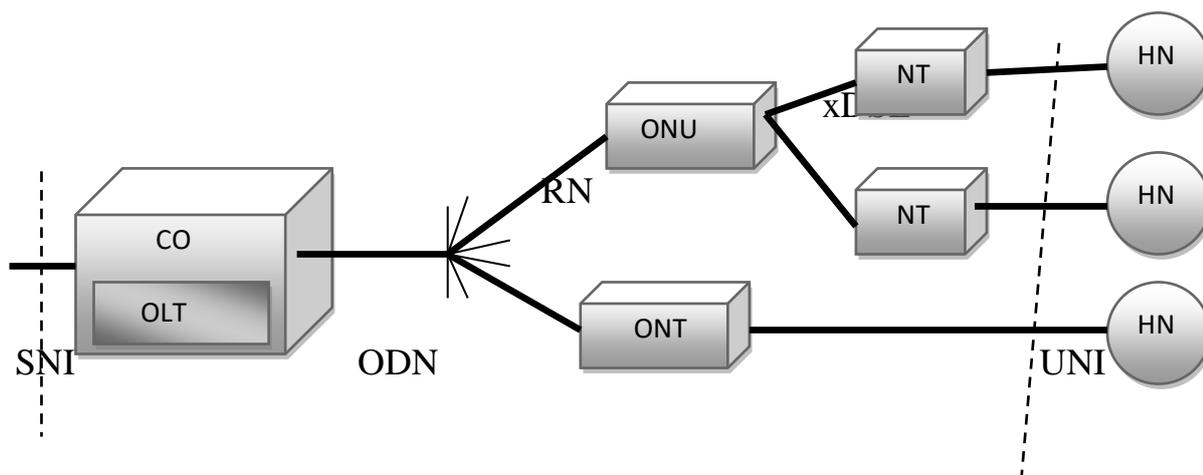


Рис 7. Оптическая сеть доступа на базе PON

На станции имеется оптический линейный терминал (Optical Line Terminal – OLT), к которому подключен входной оптический кабель сети распределения. Здесь также находится интерфейс сервисного узла (Service Node Interface - SNI). На стороне абонентов можно использовать два различных интерфейса в зависимости от числа пользователей, подключенных к одной ветке. Оптический сетевой терминал (Optical Network Terminal – ONT) представляет собой интерфейс, используемый при наличии одного единственного пользователя. В этом случае домашняя сеть пользователя (Home Network- HN) подключается непосредственно к ONT посредством интерфейса сети пользователя (User Network Interface - UNI). Если число конечных пользователей ветки больше, а их домашние сети подключены к медной разводке, используется оптический

сетевой модуль (Optical Network Unit - ONU). ONU, как правило, устанавливается в уличном шкафу или многоквартирном доме. Технология xDSL существенно ограничена по дальности действия и полосе пропускания по сравнению с оптической сетью. Интерфейсы ONU предназначены только для перехода на полностью оптические сети в будущем. Деление мощности в PON выполняется для распределения затрат и полосы пропускания OLT между несколькими интерфейсами ONU/T и уменьшения количества используемых волокон. Кроме разделения оптической мощности в одной точке сети (Рис 7) разделение сигнала может также выполняться на нескольких уровнях, причем совокупный коэффициент деления не должен превышать максимального коэффициента деления. Чаще всего встречается деление на нескольких уровнях (Рис 8). Первый уровень может находиться уже на станции, а последний в многоквартирном доме.

Используемая архитектура деления зависит от географического распределения пользователей, фактического числа активных подключений и предполагаемого роста сети. Операторы связи чаще всего используют деление на двух уровнях. Чем меньше уровней деления, тем проще построение сети, когда в одном месте требуется выполнить сварку волокна или установку разъемов. Когда первый кросс находится на станции и используется двухуровневое деление, обеспечивается большая гибкость, простая модернизация и эффективное управление сетью.

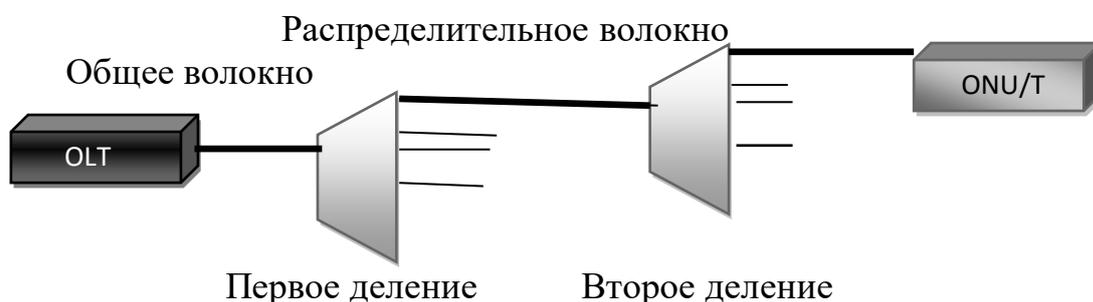


Рис 8. Оптическая сеть распределения с делением на двух уровнях

В общем случае количество уровней деления может быть на один уровень меньше числа пользователей (Рис 8). При использовании в распределительной сети топологии шины, что реализует технологическую распределительную сеть для, например, железных дорог или трубопроводов применяются сплиттеры с равномерным или неравномерным делением. Если применяются сплиттеры с равномерным (1:2) делением, то последний пользователь получит сигнал наименьшей мощности, что является существенным недостатком данной реализации. С целью равномерного распределения мощности между всеми пользователями необходимо применить сплиттеры с неравномерным коэффициентом деления. Такое решение применяется в протяженных технологических распределительных сетях, причем коэффициент деления

рассчитывается для каждого пользователя отдельно в зависимости от топологии сети.

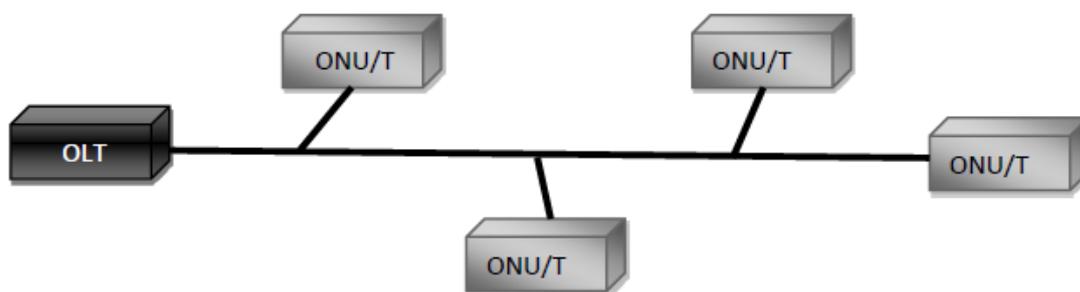


Рис 9. Оптическая распределительная сеть с топологией шины и неравномерным коэффициентом деления

3.1. Оптическое волокно

3.1.1. Типы оптических волокон

Оптические волокна обеспечивают передачу оптического излучения на разных длинах волн, имеют различные характеристики и выполняют разные задачи. Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые MMF (multi-mode fiber) и одномодовые SMF (single mode fiber).

Многомодовые волокна подразделяются на ступенчатые и градиентные.

Одномодовые волокна подразделяются на ступенчатые одномодовые волокна или стандартные волокна SF (standart fiber), на волокна со смещенной дисперсией DSF (dispersion shifted) и на волокна с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (non-zero dispersion shifted)

Типы и размеры волокон приведены на рис 10. Каждое волокно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления. Сердцевина, по которой происходит распространение светового сигнала, изготавливается из оптически более плотного материала.

При обозначении волокна указываются через дробь значения диаметров сердцевины и оболочки. Волокна отличаются диаметром сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления сердцевины.

У многомодового градиентного волокна и одномодового волокна со смещенной дисперсией показатель преломления сердцевины зависит от радиуса. Такой более сложный профиль делается для улучшения технических характеристик в части дисперсии или для достижения других специальных характеристик волокна.

Если сравнивать многомодовые волокна между собой (рис 10 а, б), то градиентное волокно имеет лучшие технические характеристики, чем ступенчатое, по дисперсии. Главным образом это связано с тем, что межмодовая дисперсия в градиентном многомодовом волокне, являющаяся основным источником дисперсии, значительно меньше, чем в ступенчатом многомодовом волокне, что обеспечивает большую пропускную способность градиентному волокну.

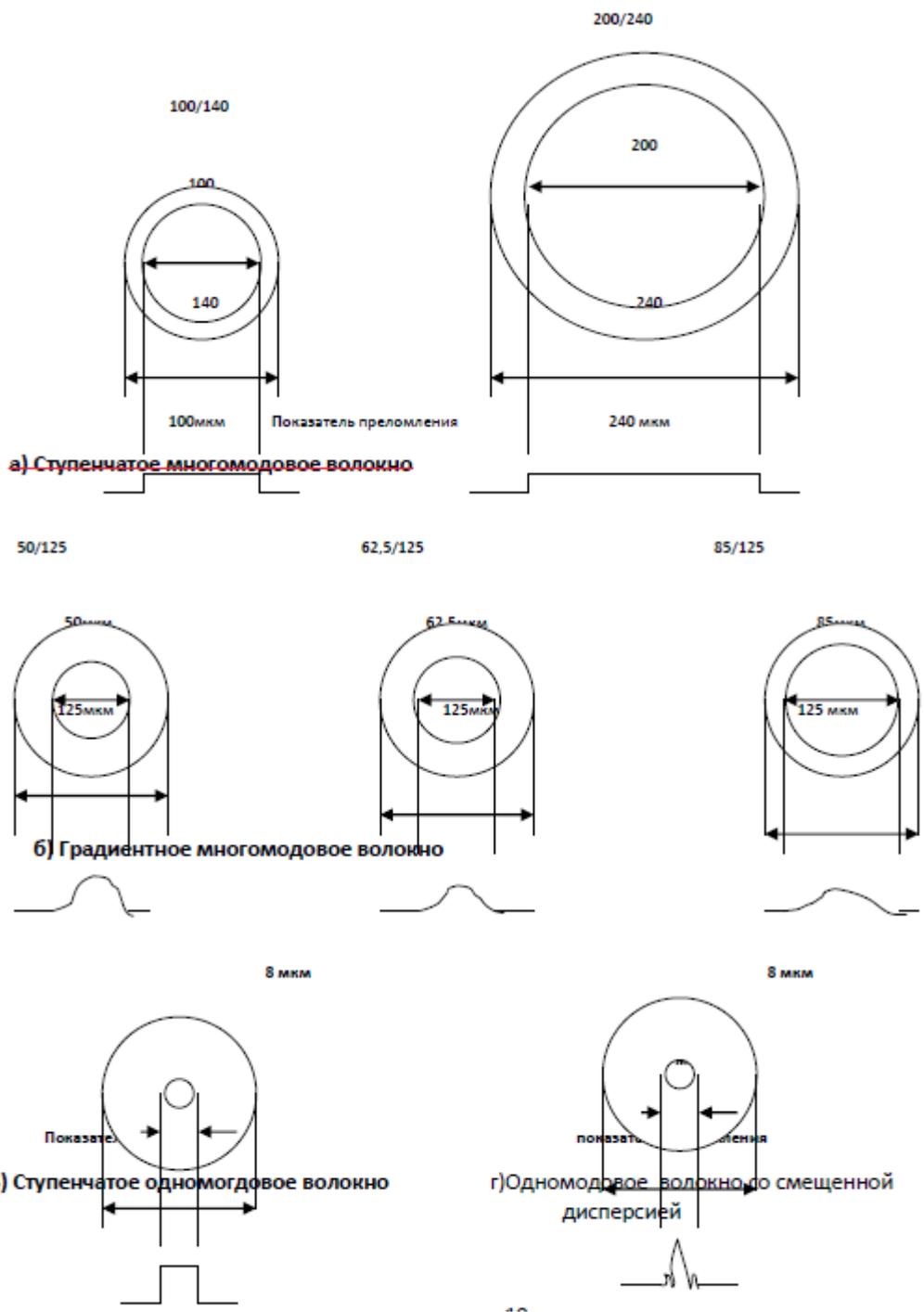


Рис. 10. Типы оптических волокон

Одномодовое волокно имеет значительно меньший диаметр сердцевины по сравнению с многомодовым и, как следствие, из-за отсутствия межмодовой дисперсии, более высокую пропускную способность. Однако, оно требует применения более дорогих лазерных передатчиков.

В волоконно-оптических системах передачи наиболее широко используются следующие стандарты оптических волокон:

- многомодовое градиентное волокно 50/125 (рис 10 а);
- многомодовое градиентное волокно 62,5/125 (рис 10. б);
- одномодовое ступенчатое (стандартное) волокно SF 8-10/125 (рис 10. в);
- одномодовое волокно со смещенной дисперсией DSF 8-10/125 (рис 10. г);
- одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF (по профилю показателя преломления это волокно схоже с DSF).

Волоконно-оптические системы передачи используют область инфракрасного спектра в диапазоне от 800 до 1600 нм в трех окнах прозрачности 850, 1310 и 1550 нм. Именно в окрестности этих трех длин волн образуются локальные минимумы затухания сигнала, что обеспечивает большую дальность передачи.

Многомодовые градиентные волокна. В стандартном многомодовом градиентном волокне (50/125 или 62,5/125) диаметр светонесущей жилы 50 и 62,5 мкм, что на порядок больше длины волны передачи. Это приводит к распространению множества различных типов световых лучей – мод – во всех трех окнах прозрачности. Для передачи света по многомодовому волокну используют окна прозрачности 850 и 1310 нм.

Одномодовые волокна. В ступенчатом одномодовом волокне SF диаметр светонесущей жилы составляет 8-10 мкм и сравним с длиной световой волны. В таком волокне при достаточно большой длине волны $\lambda \geq \lambda_{CF}$ (λ_{CF} - длина волны отсечки) распространяется только один луч (одна мода). Одномодовый режим в одномодовом волокне реализуется в окнах прозрачности 1310 и 1550 нм. Распространение только одной моды устраняет межмодовую дисперсию и обеспечивает очень высокую пропускную способность одномодового волокна в этих окнах прозрачности. Наилучший режим распространения с точки зрения дисперсии достигается в окрестности длины волны 1310 нм, когда хроматическая дисперсия обращается в ноль. С точки зрения потерь это не самое лучшее окно прозрачности. В этом окне потери составляют 0,3-0,4 дБ/км, в то время, как наименьшее затухание 0,2-0,25 дБ/км достигается в окне 1550 нм.

В одномодовом волокне со смещенной дисперсией DSF длина волны, на которой результирующая дисперсия обращается в ноль (длина волны нулевой дисперсии λ_0), смещена в область окна 1550 нм. Такое смещение достигается благодаря специальному профилю показателя преломления волокна, рис 10.г. Таким образом, в волокне со смещенной дисперсией реализуются наилучшие характеристики как по минимуму дисперсии, так и по минимуму потерь. Поэтому такое волокно лучше подходит для строительства протяженных высокоскоростных линий связи с расстоянием между переприемными участками до 100 и более км.

Одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией NZDSF в отличие от DSF оптимизировано для передачи не одной длины волны, а сразу нескольких длин волн (сигнала со спектральным уплотнением WDM) и наиболее эффективно может использоваться при построении магистралей полностью оптических сетей, т.е. сетей, на узлах которых не происходит оптоэлектронного преобразования при распространении оптического сигнала.

Передача спектрально уплотненного сигнала на большие расстояния требует использования линейных широкополосных оптических усилителей, из которых наибольшее распространение получили эрбиевые усилители на основе легированного эрбием волокна EDFA. Линейные усилители типа EDFA эффективно могут усиливать сигнал в своем рабочем диапазоне 1530-1560 нм. Длина волны нулевой дисперсии у волокна NZDSF выведена за пределы этого диапазона, что значительно ослабляет влияние нелинейных эффектов в окрестности точки нулевой дисперсии при распространении нескольких длин волн. Оптимизация трех перечисленных типов одномодовых волокон совершенно не означает, что они всегда должны использоваться исключительно под определенные задачи. Максимально допустимая длина переприемного участка определяется технико-экономическими характеристиками как самого волокна (затуханием, дисперсией и стоимостью), так и приемо-передающего оборудования (мощностью, шириной спектральной линии, скоростью передачи, спектральным уширением передаваемого импульса, чувствительностью приемника и стоимостью).

3.1.2. Распространение света по волокну

Основными факторами, влияющими на характер распространения света в волокне, наряду с длиной волны излучения, являются геометрические параметры волокна, затухание и дисперсия.

Затухание. Волокно характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией. Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого в волокне сигнала, тем больше может быть расстояние между переприемными участками. На затухание света в волокне влияют такие факторы, как потери на поглощение, потери на рассеяние и кабельные потери. Потери на поглощение и на рассеяние вместе называют собственными потерями, в то время, как кабельные потери в силу их природы называют дополнительными потерями, рис 11.

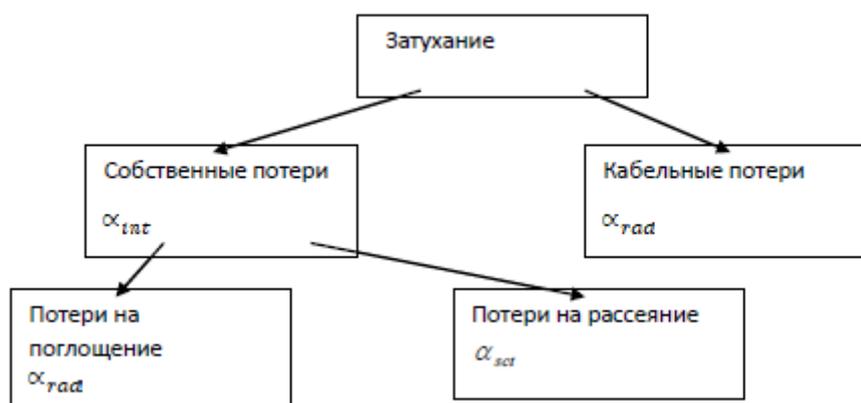


Рис 11. Основные типы потерь в волокне

Полное затухание в волокне (измеряется в дБ/км) определяется в виде суммы:

$$\alpha = \alpha_{int} + \alpha_{rad} = \alpha_{abs} + \alpha_{sc} + \alpha_{rad} \quad (1)$$

Потери на поглощение α_{abs} состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь, рис 12. Следует отметить характерный максимум в районе длины волны 1480 нм, который соответствует примесям ОН. Этот пик присутствует всегда.

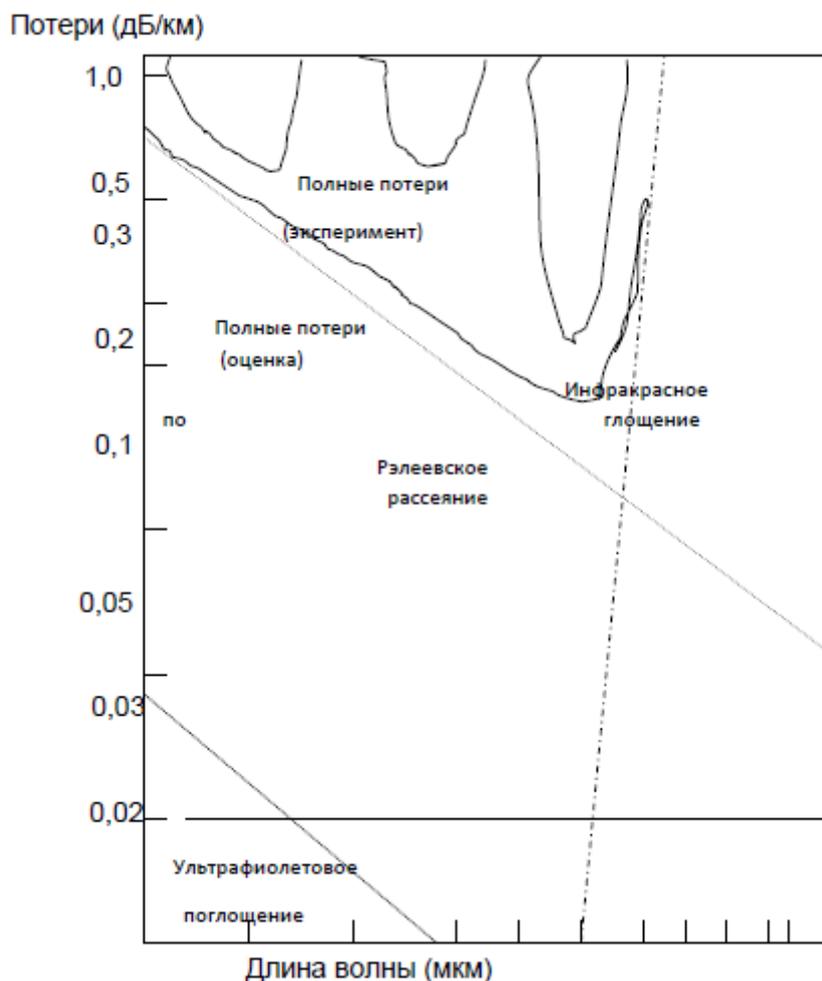


Рис 12. Факторы, влияющие на затухание в области 1550 нм

Собственные потери на поглощение растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения выше 1,6 мкм обычное кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением.

Потери на рассеяние α_{scat} . Уже к 1970 году изготавливаемое оптическое волокно становится настолько чистым (99,9999%), что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. На длине волны 800 нм затухание составило 1,5 дБ/км. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рэлеевское рассеяние света. Рэлеевское рассеяние вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в

волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна. Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону λ^{-4} и сильнее проявляются в области коротких волн (рис 12).

Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм и определяется разумным компромиссом между потерями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

Внутренние потери хорошо интерполируются формулой $\alpha = K_{rel} \lambda^{-4} + \delta_{OH}(\lambda) + Ce^{-k/\lambda}$, где $\delta_{OH}(\lambda)$ отражает пик поглощения на примесях ОН с максимумом при 1480 нм, а первое и последнее слагаемые соответствуют рэлеевскому рассеянию и инфракрасному поглощению соответственно. На рис 13 приводится общий вид спектральной зависимости собственных потерь с указанием характерных значений четырех основных параметров (минимумов затухания в трех окнах прозрачности 850, 1300 и 1550 нм и пика поглощения на длине волны 1480 нм) для современных одномодовых и многомодовых волокон.

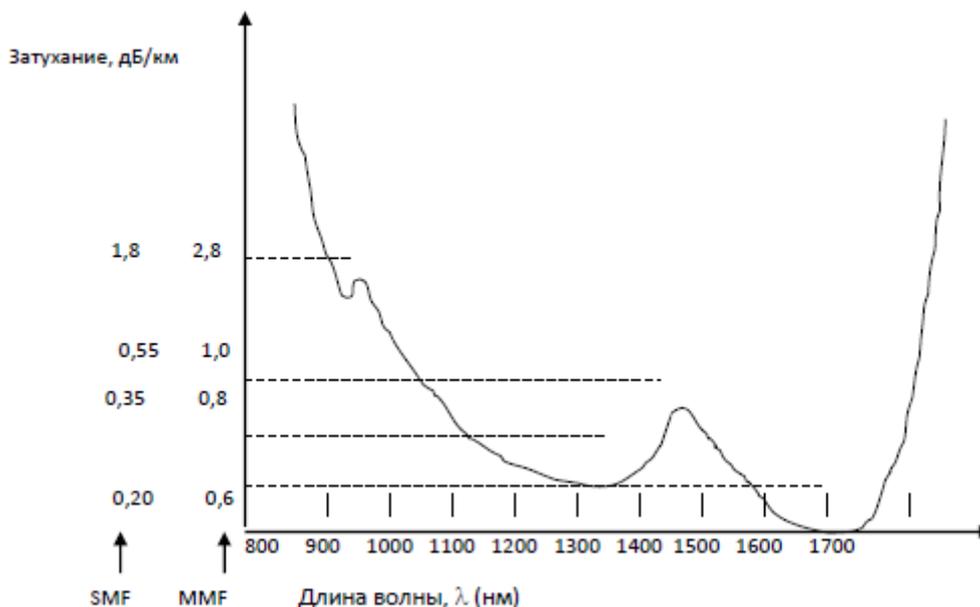


Рис.13. Собственные потери в оптическом волокне

Кабельные потери α_{rad} обусловлены скруткой, деформациями и изгибами волокон, возникающими при наложении покрытий и защитных оболочек, производстве кабеля, а также в процессе установки ВОК. При соблюдении ТУ на прокладку кабеля номинальный вклад со стороны этих потерь составляет не больше 20% от полного затухания. Дополнительные потери появляются, если радиус изгиба кабеля становится меньше минимального радиуса изгиба, указанного в спецификации на ВОК.

Дисперсия и полоса пропускания. По оптическому волокну передается не просто энергия световых импульсов, а полезный информационный сигнал.

Импульсы света, последовательность которых переносит информационный поток, в процессе распространения расплываются по длительности. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их обнаружение на приеме.

Дисперсия – уширение импульсов – имеет размерность времени и определяется как корень из разности квадратов длительностей импульсов на выходе и входе участка кабеля длины L по формуле $\tau(L) = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}$. Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км и измеряется в пс/км. Дисперсия в общем случае характеризуется тремя основными факторами:

- различием скоростей распространения направляемых мод (межмодовая дисперсия τ_{mod}),
- направляющими свойствами световодной структуры (волноводная дисперсия τ_w),
- свойствами материала оптического волокна (материальная дисперсия τ_{mat}).

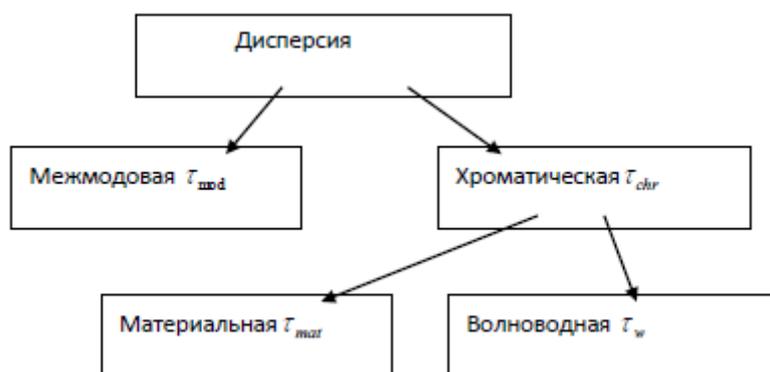


Рис. 14. Виды дисперсии

Чем меньше значение дисперсии, тем с большей скоростью поток информации можно передать по волокну. Результирующая дисперсия τ определяется из формулы

$$\tau^2 = \tau_{mod}^2 + \tau_{chr}^2 = \tau_{mod}^2 + (\tau_{mat} + \tau_w)^2 \quad (2)$$

Межмодовая дисперсия возникает вследствие различной скорости распространения у мод, и имеет место только в многомодовом волокне. Для ступенчатого и градиентного многомодового волокна с параболическим профилем показателя преломления ее можно вычислить соответственно по формулам

$$\tau_{mod,step}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_c}, L > L_c \end{cases} ; \quad \tau_{mod,grad}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{L \cdot L_c}, L > L_c \end{cases} \quad (3)$$

где L_c - длина межмодовой связи (для ступенчатого волокна порядка 5км, для градиентного – порядка 10км).

Изменение закона дисперсии с линейного на квадратичный связано с неоднородностями, которые есть в реальном волокне. Эти неоднородности приводят к взаимодействию между модами, и перераспределению энергии внутри них. При $L > L_c$ наступает установившийся режим, когда все моды в определенной установившейся пропорции присутствуют в излучении. Обычно длины линий связи между активными устройствами при использовании многомодового волокна не превосходят 2км и значительно меньше длины межмодовой связи. Поэтому можно пользоваться линейным законом дисперсии.

Вследствие квадратичной зависимости от Δ значения межмодовой дисперсии у градиентного волокна значительно меньше, чем у ступенчатого, что делает более предпочтительным использование градиентного многомодового волокна в линиях связи.

На практике, особенно при описании многомодового волокна, чаще пользуются термином полоса пропускания. При расчете полосы пропускания W можно воспользоваться формулой:

$$W = 0,44 / \tau \quad (4)$$

Измеряется полоса пропускания в МГц/км. Из определения полосы пропускания видно, что дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи и верхнюю частоту передаваемых сигналов. Физический смысл W – это максимальная частота (скорость передачи) передаваемого сигнала при длине линии 1км. Если дисперсия линейно растет с ростом расстояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

Хроматическая дисперсия состоит из материальной и волноводной составляющих и имеет место при распространении как в одномодовом, так и в многомодовом волокне. Однако наиболее отчетливо она проявляется в одномодовом волокне из-за отсутствия межмодовой дисперсии.

Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. В выражение для дисперсии одномодового волокна входит дифференциальная зависимость показателя преломления от длины волны:

$$\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda) \quad (5)$$

Волноводная дисперсия обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot 2n_1^2 \Delta / c\lambda = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda) \quad (6)$$

где коэффициенты $M(\lambda)$ и $N(\lambda)$ – удельные материальная и волноводная дисперсии соответственно, а $\Delta\lambda$ – уширение длины волны вследствие некогерентности источника излучения. Результирующее значение коэффициента удельной хроматической дисперсии определяется как $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$. Удельная дисперсия имеет размерность пс/(нм.км). Если коэффициент волноводной дисперсии всегда больше нуля, то коэффициент материальной дисперсии может быть, как положительным, так и

отрицательным. Здесь важно то, что при определенной длине волны (примерно 1310 ± 10 нм для ступенчатого одномодового волокна) происходит взаимная компенсация $M(\lambda)$ и N , а результирующая дисперсия $D(\lambda)$ обращается в ноль. Длина волны, при которой это происходит, называется длиной волны нулевой дисперсии λ_0 . Обычно указывается некоторый диапазон длин волн, в пределах которого может варьироваться λ_0 для данного конкретного волокна.

Хроматическая дисперсия связана с удельной хроматической дисперсией простым соотношением $\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ - ширина спектра источника излучения. К уменьшению хроматической дисперсии всегда ведет использование более когерентных источников излучения.

3.1.3. Характеристики поставляемых волокон

Среди множества мировых производителей оптического волокна выделяются три крупнейших: Corning Optical Fiber, Lucent Technologies и Alcoa Fujikura. Кроме того, существуют сотни менее крупных производителей волокна.

Градиентное многомодовое волокно. Широко используются два стандарта многомодового градиентного волокна – 62,5/125 и 50/125, отличающиеся профилем сердцевины, рис 15 а. Соответствующие спектральные потери для этих волокон показаны на рис 15 б.

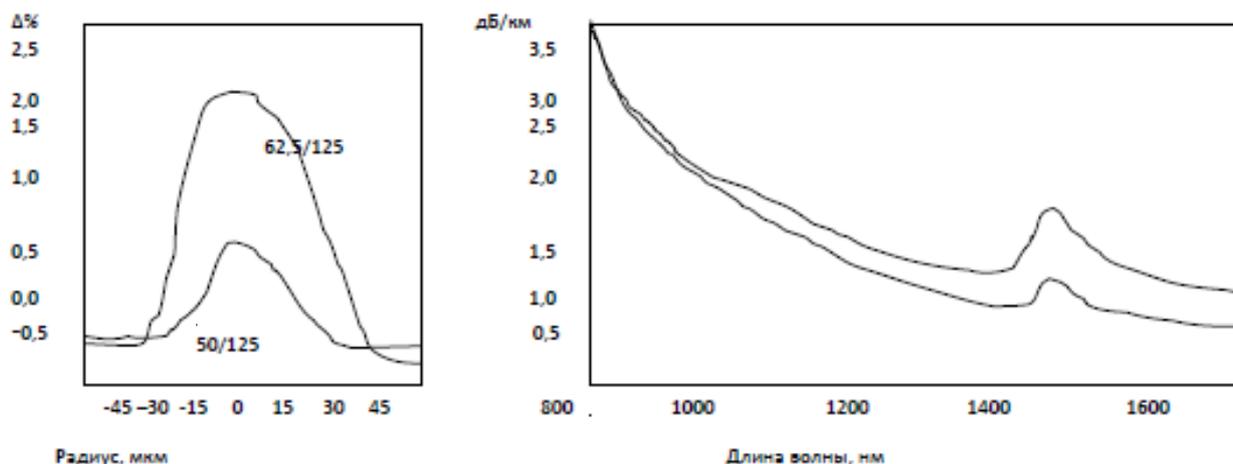


Рис 15. а) профили показателей преломления, б) спектральные потери для многомодовых градиентных волокон 50/125 и 62,5/125

Полоса пропускания на длине волны 1300 нм превосходит соответствующее значение на длине волны 850 нм. Это объясняется следующим. Дисперсия, которая определяет полосу пропускания, состоит из межмодовой и хроматической составляющих.

Межмодовая дисперсия слабо зависит от длины волны, поскольку зависимостью показателя преломления от длины волны можно пренебречь (2.3). Хроматическая дисперсия пропорциональна ширине спектра излучения. Коэффициент пропорциональности $D(\lambda)$ при длинах волн в окрестности 1300 нм (λ_0) близок к нулю, в то время, как на длине волны 850 нм примерно равен

100 пс/($\text{нм}^2 \cdot \text{км}$). Это приводит к тому, что хроматическая дисперсия на длине волны 850 нм начинает играть существенную роль наряду с межмодовой дисперсией. По этой причине градиентные многомодовые волокна используются в диапазоне длин волн 1300 нм. Реальные волокна имеют здесь полосу пропускания до 1000 МГц·км, что дает возможность реализовать длину регенерационного участка до 25 км при скорости передачи 34 Мбит/с.

Одномодовое волокно. С точки зрения дисперсии существующие одномодовые волокна делятся на три основных типа: стандартные волокна со ступенчатым профилем (с несмещенной дисперсией) SF, волокна со смещенной дисперсией DSF и волокна с ненулевой смещенной дисперсией. Все три типа волокон очень близки по затуханию, но отличаются характеристиками хроматической дисперсии.

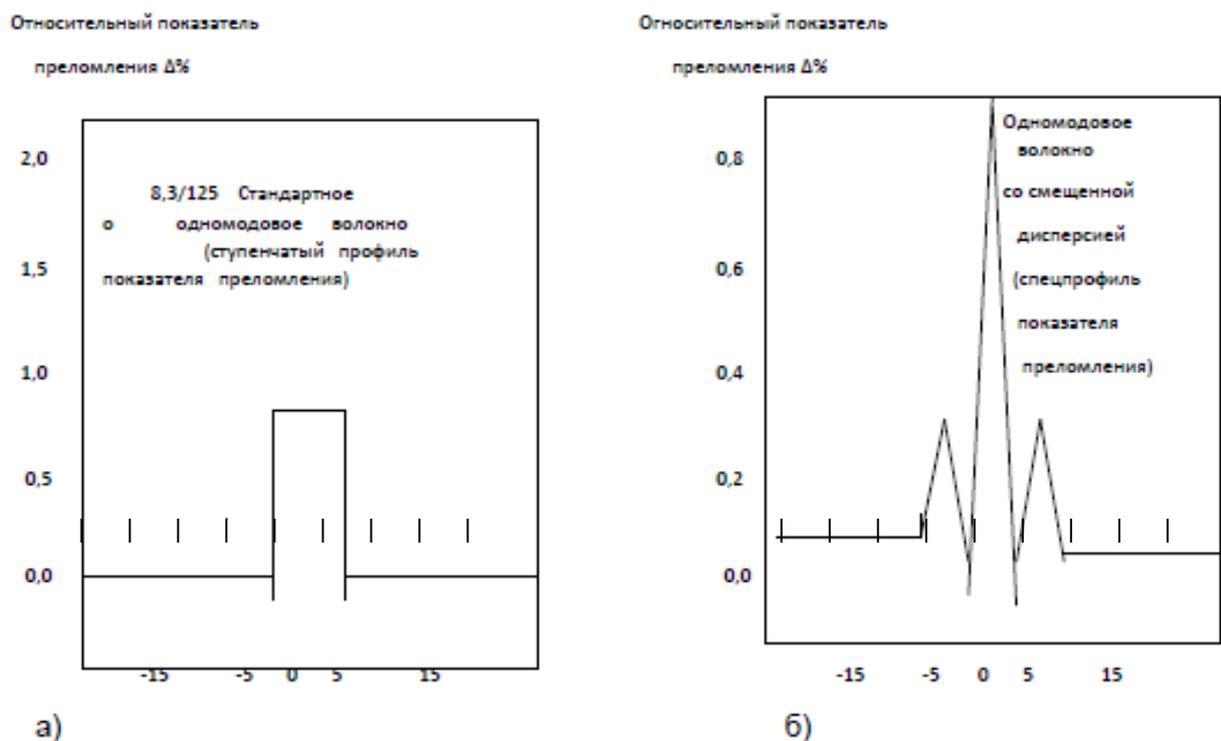


Рис. 16. Профили показателей преломления, а) ступенчатое (стандартное) одномодовое волокно; б) одномодовое волокно со смещенной дисперсией (волокно со специальным профилем)

Волокно SF. В начале 80-х годов прошлого века передатчики на длину волны 1550 нм имели очень высокую цену и не могли конкурировать на рынке с передатчиками на длину волны 1300 нм. Поэтому стандартное ступенчатое волокно стало первым коммерческим волокном и сейчас наиболее широко распространено в телекоммуникационных сетях. Оно оптимально по дисперсии для работы в окне 1310 нм, хотя затухание в этом окне больше, чем в окне 1550 нм.

Волокно DSF. По мере совершенствования элементной базы для систем передачи на волне 1550 нм встала задача разработки волокна с длиной волны нулевой дисперсии, попадающей внутрь этого окна. В итоге в середине 80-х годов было создано волокно со смещенной дисперсией, полностью

оптимизированное для работы в окне 1550 нм как по затуханию, так и по дисперсии. На протяжении многих лет волокно DSF считалось самым перспективным волокном. С появлением технологии передачи мультиплексного оптического сигнала начинают применяться эрбиевые оптические усилители EDFA, способные усиливать многоканальный оптический сигнал WDM. Однако, исследования показали, что именно длина волны нулевой дисперсии (1550 нм), попадающая внутрь рабочего диапазона эрбиевого усилителя, является главным потенциальным источником нелинейных эффектов и, прежде всего, четырехволнового смешивания, которые проявляются в резком возрастании шума при распространении многоканального сигнала.

Четырехволновое смешивание – это эффект, приводящий к рассеянию двух волн с образованием новых нежелательных длин волн. Новые волны могут приводить к деградации распространяемого оптического сигнала, интерферируя с ним, или перекачивать мощность из полезного волнового канала. Чтобы избежать нелинейных эффектов при использовании DSF в WDM системах приходилось вводить сигнал меньшей мощности, увеличивать расстояние между оптическими каналами и избегать передачи парных (симметричных относительно λ_0) каналов. Именно из-за эффекта четырехволнового смешивания стало ясно, что необходим новый тип волокна, в котором λ_0 располагалось бы по одну сторону (левее или правее) от всех возможных каналов.

Волокно NZDSF создается в начале 90-х годов с целью преодолеть нелинейные эффекты. Известное также как λ -смещенное волокно, оно характерно тем, что длина волны нулевой дисперсии вынесена за пределы полосы пропускания эрбия. Это уменьшает нелинейные эффекты и улучшает характеристики волокна при передаче DWDM сигнала.

Установка новых ВОСП или наращивание уже существующих с учетом перехода на скорости 2, 4 и 10 Гбит/с или использования волнового мультиплексирования может осуществляться с использованием трех перечисленных видов волокон. При выборе конкретного типа волокна следует учитывать такие факторы, как общая стоимость проекта, требуемые емкости каналов, надежность, сложность системы и др.

При передаче оптического сигнала по волокну нас в первую очередь интересует его затухание. Затухание определяет насколько понизилась оптическая мощность при передаче сигнала по световоду. На рис 17 показано затухание кремниевого стекла, являющееся единственной причиной затухания оптического сигнала, поскольку отражение света на границе между сердцевиной и оболочкой оптического волокна происходит без потерь. Наиболее низкое значение затухания отмечается на длине волны 1550 нм и составляет приблизительно 0,2 дБ/км. И именно для этой области существуют оптические усилители на основе эрбия.

На длинах волн свыше 1550 нм в волокне проявляется инфракрасное поглощение света, увеличивающее его затухание. На длинах волн меньше 1550

нм возникает релеевское рассеяние. Рассеяние света происходит на произвольных микроскопических неоднородностях направляющей среды, причем свет рассеивается в разные стороны. Рассеянный свет частично уходит в оболочку, частично остается в сердцевине и распространяется в обоих направлениях. Отраженный обратно свет является некогерентным и представляет собой шум. Поскольку мощность этого шума невелика, это не сказывается на правильном функционировании системы и этот свет можно использовать в специальных измерениях.

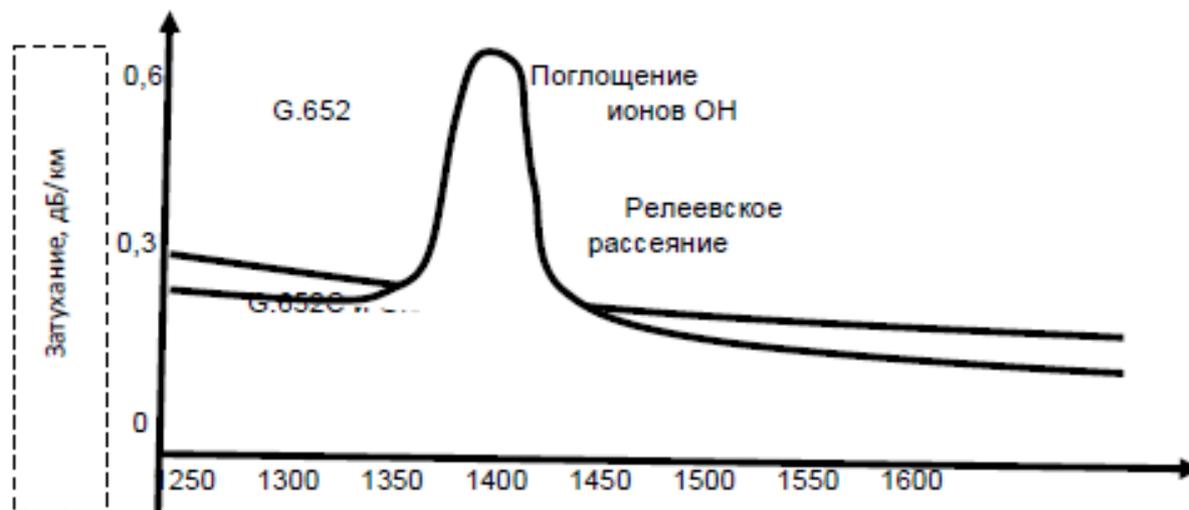


Рис 16. Затухание волокна G.652 и более новых версий G.652C и G.652D

В волокнах по устаревшему стандарту G.652 на длине волны 1390 нм присутствует гидроксидное поглощение ионов OH. В более новых версиях по стандартам G.652C G.652D такого затухания нет. Поэтому в долгосрочной перспективе, предусматривающей комбинацию с технологией WDM, при проектировании имеет смысл выбирать более современное волокно.

Несмотря на то, что лабораторные измерения затухания намного ниже значения 0,4 дБ/км, как определено ISO OS2, при расчете затухания имеет смысл учитывать небольшой резерв. В Табл. 2 приведены значения лабораторных измерений затухания в худших случаях для длин волн GPON.

Табл. 2. Затухание оптического волокна типа G.652C и G.652D

Длина волны	Лабораторное измерение	Худший вариант
1310 нм	0,33 дБ/км	0,35 дБ/км
1490 нм	0,21 дБ/км	0,27 дБ/км
1550 нм	0,19 дБ/км	0,25 дБ/км

Затухание оптического волокна особенно увеличивается на его изгибах, поэтому при прокладке оптоволоконно необходимо учитывать предписываемые стандартом минимальные радиусы изгиба. При необходимости построения сети минимально чувствительной к искривлению волокна следует воспользоваться

волокном типа G.657A. Это волокно отличается приблизительно в 10 раз меньшим затуханием на изгибах.

Преимущество многомодового волокна заключается в относительно большем радиусе сердцевины, что упрощает процесс сварки. Основным же недостатком многомодового волокна является расширение световых импульсов, вследствие межмодовой дисперсии. Именно из-за этого возникает ограничение применения многомодовых волокон для скоростей передачи свыше 100 Мбит/с на расстояниях свыше 10 км.

При прохождении оптического сигнала по одномодовому волокну возникает хроматическая дисперсия. Она возникает из-за различных скоростей распространения для различных длин волн в спектре светового сигнала. На рис 18 приведены значения дисперсии для волокна типа G.652 при длинах волн, используемых в пассивных оптических сетях. Здесь видно, что сигнал на длине волны нулевой хроматической дисперсии 1310 нм практически не подвергается дисперсии, в то время как на длинах волн 1490 нм и 1550 нм дисперсия существенно влияет на сигнал, ее значение достигает 14 и даже 17 пс/(нмкм).

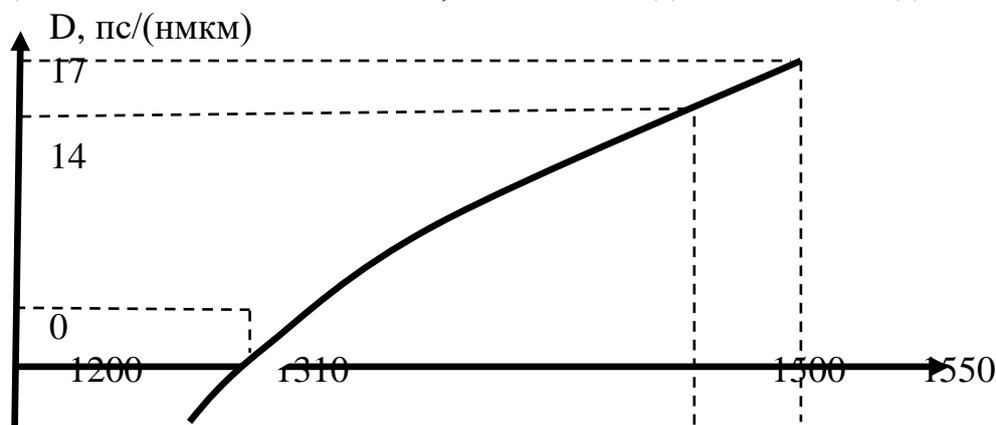


Рис 17. Хроматическая дисперсия в волокне G.652 в зависимости от длины волны

Таким образом, для хроматической дисперсии, кроме центральной длины волны лазера, очень важна спектральная ширина полосы излучения лазера. Лазер Фабри Перо (FP) имеет спектр шириной 3 нм, что в комбинации с передачей на длине волны 1550 нм, обладающей высокой хроматической дисперсией, существенно ограничит скорость передачи и дальность действия. Лазеры FP в комбинации с волокном G.652 имеет смысл использовать только на длине волны 1310 нм. Поэтому в PON для восходящего трафика применяют FP лазер на длине волны 1310 нм.

На длинах волн, где возникает дисперсия подходят DFB лазеры с распределенной обратной связью. В этом случае спектр немодулированного источника света намного уже спектра передаваемого сигнала.

Исследования показывают, что дисперсия оказывает квадратичное воздействие на производительность соединения, если используется амплитудная модуляция. При увеличении скорости передачи в n раз дальность действия уменьшается в n^2 раз. Так, например, при Гауссовой форме

импульса и реализации соединения со скоростью передачи 10 Гбит/с дальность действия соединения составит всего 76 км. Для увеличения дальности действия необходимо использовать модули компенсации дисперсии.

Кроме затухания и дисперсии передача данных по кремниевому волокну ограничивается также нелинейными явлениями. В PON наиболее ограничивающим эффектом обладает рассеяние Бриллюэна, возникающее на высоких скоростях передачи и узком спектре передаваемого сигнала.

При прохождении по стеклянному волокну оптическая волна из-за электроакустического эффекта генерирует в обратном направлении рассеянный свет с отрицательным смещением Допплера. Это явление называется вынужденным рассеянием Бриллюэна (Stimulated Brillouin Scattering - SBS). Частотное смещение назад рассеянного света составляет приблизительно 11 ГГц. Отражаемый в обратную сторону свет может мешать системе передачи, так как он вносит шум, который можно устранить с помощью оптического изолятора.

Таким образом, рассеяние Бриллюэна ограничивает максимальную мощность света, передаваемого по оптическому волокну. При увеличении мощности из-за рассеяния Бриллюэна выходная мощность не увеличивается, а увеличивается отражение в обратную сторону. В результате рассеяние Бриллюэна определяет максимальную мощность передаваемого сигнала. Она зависит от ширины спектра оптического сигнала и на практике может превышать 20 дБм.

Поскольку цифровые сигналы имеют широкий модуляционный спектр, на них не должно оказывать воздействие рассеяние Бриллюэна. Аналоговые телевизионные сигналы напротив имеют узкий модуляционный спектр и поэтому подвержены рассеянию Бриллюэна.

Вынужденное рассеяние Бриллюэна можно уменьшить за счет увеличения спектральной ширины оптического сигнала. Поскольку оптические сигналы с широким спектром более подвержены дисперсионным искажениям, необходимо найти правильное соотношение между рассеянием Бриллюэна и дисперсией.

3.2. Пассивные оптические компоненты

Пассивные оптические компоненты включают в себя оптические соединители, розетки, шнуры, распределительные панели, кроссовые шкафы, соединительные муфты, оптические разветвители, аттенюаторы, системы спектрального уплотнения и т. д., то есть все, что необходимо для обеспечения передачи оптического сигнала по волоконно-оптическому кабелю от передатчика к приемнику.

По мере роста сложности и увеличения протяженности ВОСП роль пассивных компонентов возрастает. Практически все системы волоконно-оптической связи, реализуемые для магистральных информационных сетей,

локальных вычислительных сетей и сетей кабельного телевидения охватывают сразу все многообразие пассивных волоконно-оптических компонентов.

Самым важным вопросом передачи информации по ВОСП является обеспечение надежного соединения оптических волокон. Оптический соединитель – это устройство, предназначенное для соединения различных компонентов волоконно-оптического линейного тракта в местах ввода и вывода излучения. Такими местами являются: оптические соединения оптоэлектронных преобразователей (приемников и передатчиков) с волокном кабеля, соединения отрезков оптического кабеля между собой, а также с другими компонентами. Различают неразъемные и разъемные соединители. Неразъемные соединители используются в местах постоянного монтажа кабельных систем. Основным методом монтажа, обеспечивающим неразъемное соединение, является сварка. Разъемные соединители или коннекторы допускают многократные соединения/разъединения. Промежуточное положение занимают соединения типа механический сплайс.

3.2.1. Разъемные соединители

Типы конструкций. По конструкции соединители бывают симметричными и несимметричными. При несимметричной конструкции для организации соединения требуется два элемента: соединитель гнездовой и соединитель штеккерный. Оптическое волокно в капиллярной трубке коннектора-штеккера не доходит до торца капилляра, а остается в глубине. Напротив, волокно в гнездовом соединителе выступает наружу. При организации соединения физический контакт волокон происходит внутри наконечника-капилляра, который обеспечивает соосность волокон. Примером несимметричной конструкции является соединитель типа SC.

При симметричной конструкции для организации соединения требуется три элемента: два соединителя и переходная розетка. Главным элементом соединителя является наконечник. Переходная розетка снабжается центрирующим элементом, выполненным в виде трубки с продольным разрезом – должен быть контакт между наконечником и центрирующим элементом розетки. Центрирующий элемент плотно охватывает наконечники и обеспечивает их строгую соосность.

Внешний диаметр наконечника равен 2,5 мм. Наиболее жесткие требования предъявляются к параметрам отверстия (капилляра) наконечника. Оно должно быть достаточно большим, чтобы волокно могло зайти в него, и при этом достаточно малым, чтобы люфт волокна был незначительным. Диаметр отверстия в соответствии со стандартом равен $126+1/-0$ мкм для одномодового волокна и $127+2/-0$ мкм для многомодового волокна. Наконечники обычно бывают металлические (на основе нержавеющей стали) и керамические (на основе циркония или оксида алюминия). Примером симметричной конструкции является соединитель типа FC.

К соединителям предъявляются следующие основные требования: малые вносимые потери, малое обратное отражение, устойчивость к внешним

механическим, климатическим и другим воздействиям, высокая надежность и простота конструкции, незначительное ухудшение характеристик после многократных повторных соединений.

Вносимые потери. Коэффициент передачи оптической мощности D при торцевом соединении определяется как $D = P_{out} / P_{in}$, где P_{in} и P_{out} соответственно интенсивности излучения на входе и выходе соединения. Обычно вносимые потери зависят от типа волокна (многомодовое или одномодовое), типов и качества соединителей и составляют от 0,2 до 0,5 дБ. Вносимые потери можно разбить на две категории: внутренние и внешние потери.

Внутренние потери определяются факторами, которые невозможно контролировать (достичь их улучшения при заделке волокна в соединитель), а именно парной вариацией диаметров сердцевин, показателей преломления, числовых апертур, эксцентриситетов сердцевина/оболочка и концентричности сердцевины у волокон с разных сторон. Все эти потери следует учитывать аддитивно. На внутренние потери влияет технология производства волокна, а не конструкция соединителя.

Потери из-за вариации показателей преломления являются следствием френелевского рассеяния и определяются в простейшем случае для волокна со ступенчатым профилем как $a_f = -10\lg(4n_1n_2 / (n_1 + n_2))$, дБ, где n_1 и n_2 - показатели преломления волокон. Эти потери пропадают только при равенстве показателей преломления. Потери при вариации апертур возникают в том случае, если апертура волокна, передающего сигнал NA_1 , больше апертуры волокна, принимающего сигнал NA_2 , и определяются как $a_{NA} = -10\lg(NA_2 / NA_1)$, дБ. При $NA_1 < NA_2$ апертурные потери не возникают. Потери при вариации диаметров возникают, когда диаметр передающего волокна меньше диаметра принимающего, и определяются соотношением $a_D = -10\lg(D_2 / D_1)^2$, дБ, где D_1 и D_2 - диаметры передающего и принимающего волокон, соответственно. При $D_1 < D_2$ потери не возникают.

Соединение волокон 62,5/125 и 50/125. В настоящее время существуют два основных широко распространенных стандарта многомодового градиентного волокна. Многомодовое волокно получило наибольшее распространение в локальных сетях. Если свет распространяется из волокна 50/125 в волокно 62,5/125, то потери интенсивности света не происходит. Если же свет переходит из волокна 62,5/125 в волокно 50/125, то только до $(50/62,5)^2$ интенсивности света будет во втором волокне, что соответствует потерям 1,94 дБ. Этот факт обычно учитывается при производстве оптических приемопередатчиков – светодиод передатчика рассчитан на волокно меньшего диаметра, а приемник в этом же устройстве на волокно большего диаметра.

Более того, многие сетевые стандарты закладывают большой запас по затуханию. Например, стандарты физического уровня на многомодовое волокно FDDI, Fast Ethernet (100 Base-FX) рассчитаны на максимально допустимое затухание в линии до 11 дБ при максимально допустимом расстоянии 2 км. Если учесть, что потери в кабеле составляют 3 дБ/км, а в

соединителе с одноподобными волокнами – 0,5 дБ, то один дополнительный переход с 62,5 на 50 мкм, вносящий затухание 2 дБ, не будет критичным даже при максимальной длине кабельного участка.

Соединение многомодового и одномодового волокон. Еще большие внутренние потери (примерно 16 дБ) возникают при сопряжении многомодового и одномодового волокна, когда свет распространяется из первого во второе волокно.

Внешние потери – это потери, которые являются следствием несовершенства как самой конструкции соединителя, так и процесса сборки оптического шнура. Внешние потери зависят от таких факторов как: механическая нестыковка (угловое смещение Θ , радиальное смещение L , осевое смещение S); шероховатости на торце сердцевин; загрязнение участка между торцами волокон рис. 18. Некачественная полировка торцов волокон, а также трение, возникающее при многократном переключении соединителей, имеющих физический контакт, может привести еще к одному типу потерь – потерь, связанных с рассеянием на микротрещинах.

Обычно суммарные потери в соединителе не превышают 0,3-0,4 дБ для одномодового и многомодового волокон. При этом более жесткие требования предъявляются к качеству одномодового соединителя.

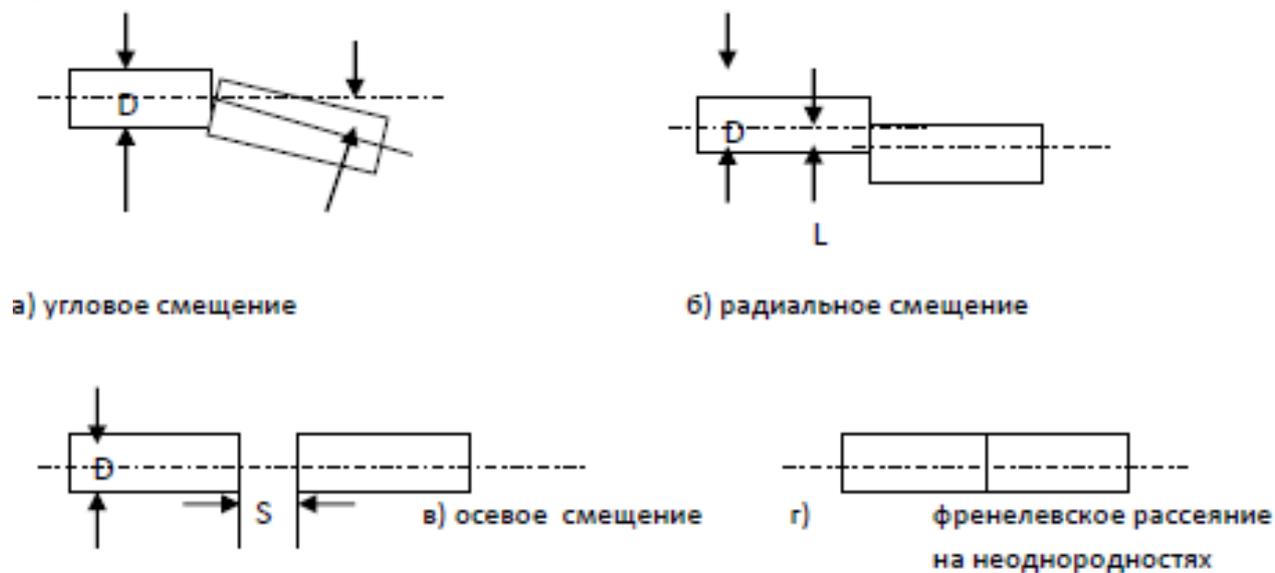


Рис.18. Главные причины внешних потерь в соединителе

Обратное отражение. Контакты типа PC, Super PC, Ultra PC, APC. Рассеяние не только ведет к ослаблению проходящего сигнала, но и увеличивает обратный световой поток. Сильное обратное отражение от стыков соединителей при передаче по одномодовому волокну может взаимодействовать с активной средой одномодового лазерного диода и, в конечном итоге, приводить к ненужным дополнительным световым сигналам. В абонентских широкополосных сетях кабельного телевидения, использующих широкополосные (до 1 ГГц) аналоговые оптические передатчики, такая обратная связь приводит к паразитной интерференции

передаваемых сигналов, в результате чего ухудшается качество видеоизображения. При цифровой передаче влияние обратного рассеяния менее критично, однако суммарный эффект обратного рассеяния на стыках нескольких соединителей может быть причиной увеличения коэффициента ошибок приемного устройства.

Обратное отражение является вторым по пагубности фактором после вносимых потерь. Коэффициент обратного отражения R определяется как $R = P_r / P_{in}$, а потери на обратном отражении или просто обратные потери b – определяются как $b = 10 \lg P_r / P_{in}$, дБ, где P_r – интенсивность отраженного излучения. Знак минус (в отличие от соотношения для вносимых потерь) здесь намеренно отсутствует, чтобы показать, что лучшими характеристиками обладает соединение с более низкими вносимыми потерями (ближе к 0 дБ) и более низкими (более отрицательными) обратными потерями.

Основным фактором, вносящим вклад в обратное отражение, является френелевское отражение вследствие зазора S (обычно воздушного) между торцами соединяемых волокон. При малых значениях $S/\lambda < 0,1$ вклад френелевского отражения во вносимые потери пренебрежимо мал, однако именно френелевское отражение является главным фактором обратных потерь. Значительное уменьшение зазора достигается при сферической поверхности торцов, что позволяет обеспечить *физический контакт* (physical contact, PC) волокон. Дело в том, что при использовании плоской поверхности торцов наиболее вероятно, что торцы обоих наконечников, из-за трудности практического создания весьма близких к нормали поверхностей, будут иметь небольшие отклонения, вполне достаточные для образования зазора между сердцевинами волокон. Так отклонение на угол $0,05^\circ$ между плоскостями наконечников приводит к зазору около 1 мкм. При сферической поверхности торцов соприкосновение торцов всегда происходит в окрестности светонесущей сердцевины волокон, рис 19.

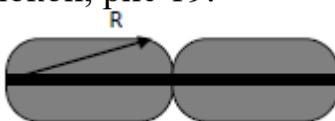


Рис.19. Сферическая поверхность – физический контакт PC

Существуют три градации сферического контакта, отличающиеся качеством технологии изготовления и, вследствие этого уровнем потерь на обратном отражении: PC < -30 дБ; Super PC < - 40 дБ; Ultra PC < - 50 дБ. Радиус кривизны R при PC-соединении может находиться в диапазоне от 15 до 25 мм. Обратное рассеяние может быть еще больше уменьшено при использовании углового (наклонного) физического контакта (angled PC, APC), когда сферические поверхности торцов закруглены под углом друг к другу. При наклонном торце даже в том случае, когда нет физического контакта, сильный отраженный сигнал не распространяется обратно по сердцевине волокна, а попадает в оболочку. Угол наклона Θ наконечника определяется как угол между осью световодной сердцевины и нормалью к плоскости, касательной в

точке поверхности, где находится сердцевина. Потери на обратном отражении для АРС обычно меньше – 60 дБ, а типичные значения могут быть – 75 дБ. Радиус кривизны R для АРС может находиться в диапазоне от 5 до 15 мм. Уменьшение этой величины по сравнению с РС объясняется тем, что меньший радиус кривизны обеспечивает большую вариацию угла $\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$ между наконечниками при сохранении физического контакта.

В широкополосных абонентских сетях кабельного телевидения, а также в высокоскоростных оптических магистралях (2,5 Гбит/с и более) и магистралях со спектральным уплотнением рекомендуется использование стандарта АРС.

Надежность, механические, климатические и другие воздействия. Обычно соединители рассчитаны на 500 – 1000 переключений. За это время увеличение вносимых потерь не должно превысить 0,2 дБ. Этого количества подключений при обычной эксплуатации более, чем достаточно. Разъемное соединение считается наиболее слабым звеном в кабельной системе. Сильное напряжение на стационарный кабель, идущий к соединителю, или резкие воздействия (на кабель, на соединитель) могут привести к ухудшению технических характеристик соединения или повредить его. Обычно места крепления переходных розеток делаются в закрытых шкафах или коробках. Аккуратная эксплуатация мест кроссирования оптических кабелей увеличивает срок службы соединителей и всей кабельной системы в целом.

3.2.2. Оптический сплиттер

Одним из основных элементов пассивной оптической сети является компонент, разделяющий оптический сигнал с одного волокна между несколькими волокнами. Этим компонентом является сплиттер. В пассивной оптической сети сплиттеры используются в случае, когда необходимо разделить оптический сигнал на несколько сигналов. Сплиттеры применяются как в оптической сети, так и в измерительном оборудовании.

В зависимости от направления передачи света в сплиттере может выполняться деление или объединение (направленный ответвитель) сигнала. Для линейного взаимнообратного сплиттера действует принцип обратности. В случае направленного ответвителя, показанного на Рис 20, свет из первого входа равномерно делится между вторым и третьим выходами.

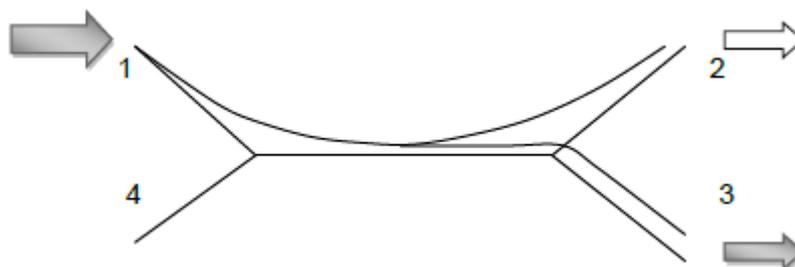


Рис. 20. Функционирование направленного ответвителя

Это действительно только для определенной длины волны или диапазона длин волн. Также действительно (принцип обратности), что свет, поступающий на второй вход, равномерно делится между первым и четвертым выходами.

Поскольку сплиттер является пассивным взаимобратным элементом, его можно использовать как для деления, так и для объединения сигналов. В случае Y-образного сплиттера свет, поступающий на первый вход, также равномерно делится между вторым и третьим выходами. Из-за принципа обратности свет, поступающий на второй вход, ослаблен на первом выходе на 50% (3 дБ). Если при помощи Y-образного сплиттера попытаться объединить два сигнала, то они будут объединены, но каждый из них потеряет половину мощности. То есть в силу принципа обратности потери вносятся и при объединении сигналов с двух волокон.

В зависимости от типа сети, в которой используются сплиттеры, они могут состоять из многомодового или одномодового волокна. Каждый сплиттер имеет три основные характеристики: коэффициент деления, вносимое затухание и рабочий частотный диапазон.

В пассивной оптической сети доступа сплиттеры используются чаще всего для деления одного сигнала на несколько, чтобы разделить один сигнал со станции между несколькими пользователями. Оптический сплиттер представляет собой волоконный элемент, соединяющий одно волокно с несколькими волокнами (пример деления 1:4 приведен на Рис 21). Поступающий на вход оптический сигнал появляется на всех выходах. При этом мощность входного сигнала делится между всеми выходами.

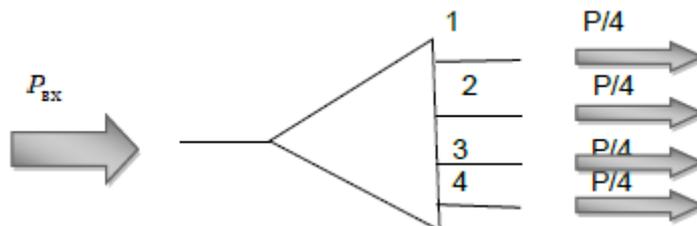


Рис 21. Сплиттер PON на 4 выхода

Первой важной характеристикой сплиттеров является **коэффициент деления**. В случае равномерного деления мощности между всеми выходами выходная мощность уменьшается в соответствии с коэффициентом деления – количеством выходов N.

$$P_{вых} = P_{вх} / n$$

или в дБ коэффициент деления [дБ] = $-10 \lg(1/n)$

Коэффициенты деления для различных сплиттеров, обеспечивающих равномерное деление мощности входного сигнала приведены в Табл. 3. Здесь n представляет собой степень деления сплиттера. Коэффициент деления в дБ можно рассчитать путем умножения степени деления теоретически на 3, практически на 3.3 дБ.

По стандарту G. 983 на GPON предусмотрен максимальный коэффициент деления 32, а по стандарту G.984 максимальный коэффициент деления

составляет 64. Деление на 64 для пользователя в настоящее время является максимальным значением, поддерживаемым имеющейся технологией, в будущем ожидается увеличение коэффициента деления до 128 и более. Поэтому в стандарте G.984 конвергентный уровень передачи определен для 128 пользователей.

Табл. 3

Уровень деления n	Коэффициент деления $1:2^n$	Теоретическое значение коэффициента деления в дБ
1	1:2	3
2	1:4	6
3	1:8	9
4	1:16	12
5	1:32	15
6	1:64	18
7	1:128	21

При работе со сплиттерами, обеспечивающими деление сигнала на две части, чаще всего используется коэффициент деления 1/2. В практических случаях, когда необходимо ответить только небольшую часть сигнала. Используются и другие коэффициенты деления (Табл 4). Сплиттеры с неравномерным коэффициентом деления применяются в пассивных оптических сетях линейной топологии (технологические сети).

Табл. 4

Коэффициент деления	Мощность на первом выходе	Мощность на втором выходе
50%:50%	-3дБ	-3дБ
10%:90%	-10дБ	-0,46дБ
3%:97%	-15,2 дБ	-0,13дБ
2%:98%	-17дБ	-0,088дБ
1%:99%	-20дБ	-0,044дБ
0,1%:99,9%	-30дБ	-0,004дБ
0,01%:99,9%	-40дБ	- 0,0004дБ

Вторым важным параметром оптического сплиттера является **вносимое затухание**, определяющее какая часть оптического сигнала теряется в устройстве из-за соединений волокна. Типовые значения составляют около 0,3 дБ на каждый последующий уровень деления. Естественно, необходимо обеспечить как можно меньшее вносимое затухание, но здесь ограничивающим фактором выступает технология изготовления сплиттера.

Третьей важной характеристикой оптического сплиттера является диапазон длин волн, то есть **рабочий частотный диапазон**.

Пассивная оптическая сеть должна иметь прозрачную основу для обеспечения будущих расширений, увеличения полосы пропускания и использования новых длин волн. Поскольку сама сеть, не имеющая зависимых

от длины волны компонентов, прозрачна, то на удаленных узлах используются сплиттеры, коэффициент деления которых не зависит от длины волны. Данные сплиттеры должны иметь как можно более широкий рабочий диапазон, поскольку узкополосность вносит функцию фильтрации. На стороне OLT и ONU/T ситуация обратная: необходимость мультиплексирования различных длин волн приводит к необходимости использования сплиттеров, учитывающих длину волны.

Основными соединительными структурами являются соединение типа Y или сплиттер 1x2 (устройство с тремя точками подключения) и соединение типа X или сплиттер 2x2 (устройство с четырьмя точками подключения). Для обоих структур могут использоваться круговые симметричные волокна или интегрированные оптические схемы планарного типа. В зависимости от техники изготовления оптических сплиттеров они делятся на две группы:

- **волоконный сплиттер (Fused Biconical Taper – FBT)** или сварные конусные соединения (см. Рис 22) и
- **Сплиттер планарного типа (Planar Lightwave Circuits –PLC)** или световод планарного типа (см. Рис 23).



Рис. 22. Функционирование волоконного сплиттера

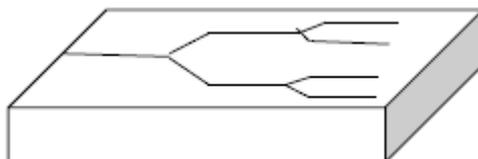


Рис. 23. Сплиттер планарного типа

Волоконный сплиттер состоит из двух оптических волокон со сближенными сердцевинами, что обычно достигается путем растягивания под воздействием температуры. В результате этого создается волоконная структура, которая способна обмениваться световыми сигналами между отдельными ответвлениями. Мощность, к примеру, может делиться между обоими оптическими волокнами. Преимущество волоконных сплиттеров заключается в том, что сигнал передается по одной среде, вследствие чего уменьшаются вносимые потери. Отдельные сплиттеры 1x2 устанавливаются в корпуса диаметром примерно 3 мм. Для создания более сложных структур используется последовательность нескольких сплиттеров 1x2, причем определенные выходы сплиттеров свариваются с входами сплиттеров следующего уровня.

Коэффициент деления волоконных сплиттеров зависит от длины волны. Ширина диапазона длин волн по стандарту для пассивных оптических сетей

зависит от центральной длины волны. В зависимости от рабочего диапазона оптические волоконные сплиттеры делятся на три группы (Рис. 24):

- одно окно – длина волны 1310 нм или 1490 нм;
- одно расширенное окно – длина волны $1310\text{ нм} \pm 25\text{ нм}$ или $1490\text{ нм} \pm 10\text{ нм}$ и
- двойное окно или широкополосный сплиттер – длина волны $1310\text{ нм} \pm 25\text{ нм}$ или $1490\text{ нм} \pm 10\text{ нм}$.

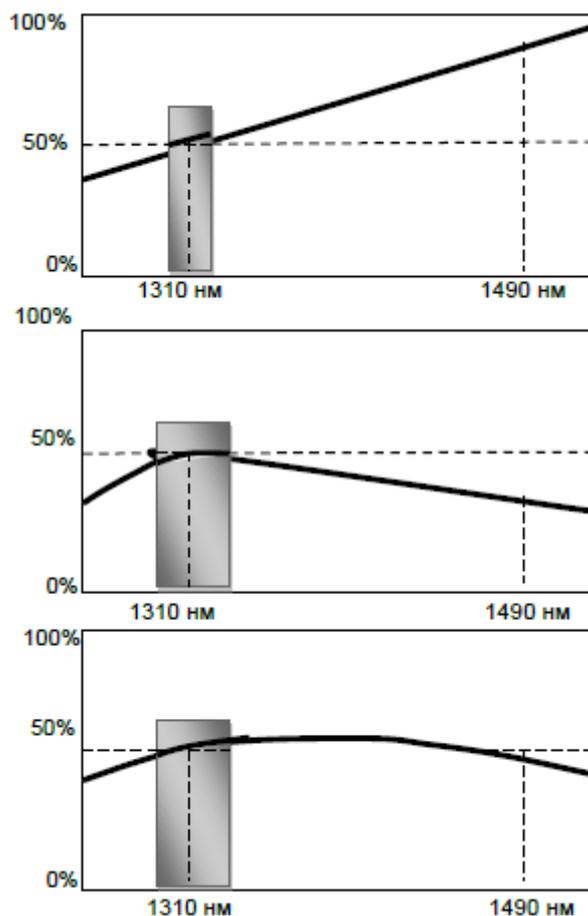


Рис 24. Сплиттер с одним, расширенным и двойным окном

Таким образом, волоконный сплиттер представляет собой зависимый от длины волны элемент, обеспечивающий деление или объединение световых сигналов различных длин волн с минимальным затуханием. Длина совмещения зависит от длины волны, поэтому необходима точная технология, посредством которой в зависимости от рабочего диапазона обеспечивается объединение или деление сигналов различных длин волн без потерь. При объединении световых сигналов необходимо обеспечить, чтобы общая длина сигналов различных длин волн была равна длине совмещения волокон. При этом сигналы различных длин волн будут объединены в одном волокне.

В результате деления сигналов сигналы различных длин волн находятся в различных волокнах.

Вторым способом изготовления оптического сплиттера является непрерывная интегрированная оптическая схема планарного типа,

объединяющая волокно на входе с волокнами на выходе. Такой сплиттер показан на Рис 23. Деление мощности обеспечивается соединением Y-типа, реализованного внутри материала с использованием фотолитографических техник, подобных тем, которые используются при производстве полупроводников. Сплиттеры планарного типа имеют отличные от волоконных сплиттеров волновые характеристики. В сплиттерах такого типа длина волны зависит от субстрата (чаще всего кремниевое стекло), используемого для изготовления интегральной схемы.

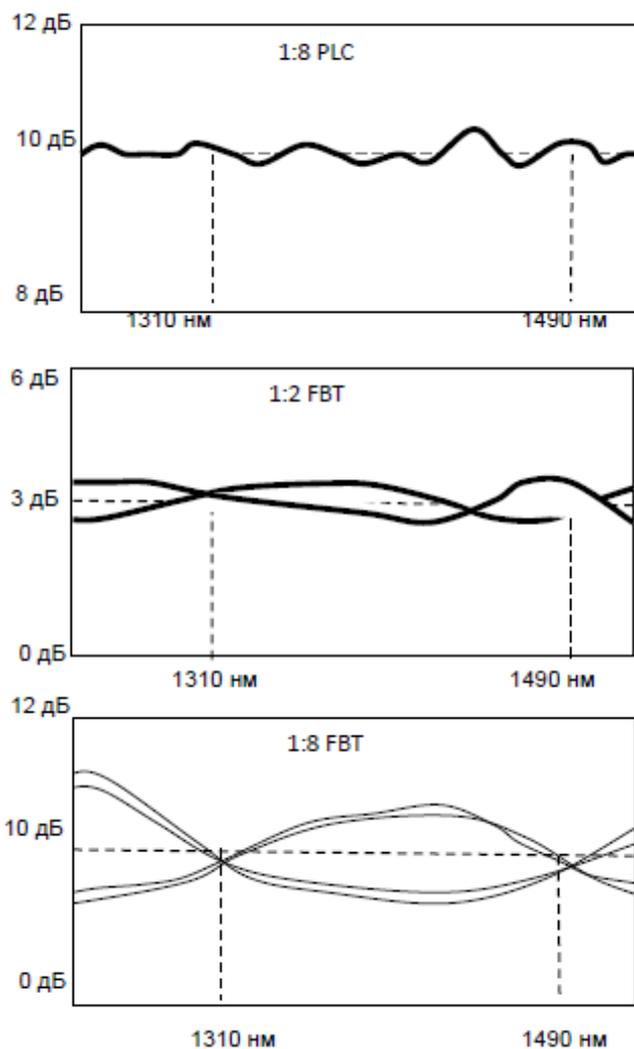


Рис 25. Вносимое затухание в зависимости от длины волны

Основным различием между волоконными и планарными сплиттерами является зависимость вносимого затухания от длины волны. На Рис 25(сверху), на котором показано вносимое затухание 1:8 сплиттера PLC в зависимости от длины волны видно, что характеристика выровнена за исключением верха ОН на длине волны приблизительно 1420 нм. Вносимое затухание для волоконного сплиттера 1:2 показано на Рис 25(в середине). Из рисунка видно, что кривые выходов сходятся только для двух длин волн. В нашем случае это 1310 нм и 1550 нм. В остальном диапазоне одна из ветвей имеет очень большое вносимое

затухание. Данное нежелательное явление еще больше проявляется при использовании сплиттеров с несколькими выходами (Рис.25 внизу). В PON желательно иметь одинаковый коэффициент деления для всех трех длин волн (1310 нм, 1490 нм, 1550 нм). С точки зрения перехода от GPON к 10GPON имеет смысл использовать сплиттеры, также обеспечивающие равномерное деление мощности на длинах волн 1270 нм и 1577 нм. Для этих целей больше подходит сплиттер PLC, коэффициент деления которого практически не зависит от длины волны.

Сплиттеры FBT не подходят, поскольку не имеют одинакового коэффициента деления для всех трех длин волн. Также они не подходят и с точки зрения перехода от GPON к 10GPON, когда будут использоваться дополнительные длины волн 1270 нм и 1577 нм.

При сравнении PLC с FBT необходимо также учесть температурно-зависимое затухание (Temperature Dependent Loss – TDL) поляризационно-зависимое затухание (Polarisation Dependent Loss – PDL) и надежность.

Ввиду самого процесса изготовления и чувствительности совмещенной части волоконного сплиттера производители должны указывать TDL. В диапазоне температур от -5°C до $+75^{\circ}\text{C}$ минимально допустимое отступление для сплиттера 1:2 составляет порядка $\pm 0,15$ дБ. На первый взгляд эта цифра мала, но нужно учитывать каскадность. Таким образом, температурно-зависимое затухание для сплиттера 1:8 в технологии FBT составляет 0,45 дБ. Сплиттеры PLC работают в диапазоне от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ с TDL порядка $\pm 0,25$ дБ. Затухание TDL всегда включается в максимально допустимое затухание сплиттеров.

Сплиттеры PLC имеют значение PDL намного меньше 0,2 дБ независимо от коэффициента деления. Сплиттер 1:2 FBT имеет значение PDL в диапазоне от 0,1 до 0,15 дБ. В этом случае также необходимо учитывать каскадирование, увеличивающее PDL волоконных ответвителей. В случае сплиттера 1:8 FBT значение PDL составляет порядка 0,45 дБ.

Надежность сплиттера зависит от вероятности отказа составных компонентов. Для создания сплиттера 1:8 FBT необходимо иметь 7 сплиттеров типа 1:2 и 6 сварных соединений. В случае PLC имеются только две критические точки: соединение на входе и соединение на выходе.

4. Оптоэлектронные компоненты PON

4.1. Передающие оптоэлектронные модули

Передающие оптоэлектронные модули (ПОМ), применяемые в PON, предназначены для преобразования электрических сигналов в оптические, которые должны быть введены в волокно с минимальными потерями. Производится большое разнообразие ПОМ, отличающихся по конструкции и по типу источника излучения. Одни работают на низких скоростях и на малые расстояния, другие передают сотни и даже тысячи мегабит в секунду на расстояния в десятки километров.

Типы и характеристики источников излучения.

Главным элементом ПОМ является источник излучения. К основным требованиям, которым он должен удовлетворять, относятся:

- излучение должно вестись на длине волны одного из окон прозрачности;
- источник излучения должен обладать соответствующим быстродействием для того, чтобы обеспечивать передачу информации на требуемой скорости;
- источник должен обеспечивать ввод излучения в волокно с минимальными потерями;
- источник излучения должен иметь достаточную для передачи на большие расстояния мощность, но и не настолько, чтобы излучение приводило к нелинейным эффектам или могло повредить волокно или оптический приемник;
- источник должен выдерживать изменения температуры в заданных пределах;
- стоимость источника излучения должна быть относительно невысокой.

В настоящее время используются два основных типа источников излучения, которые удовлетворяют этим требованиям – светодиоды (LED) и полупроводниковые лазерные диоды (LD).

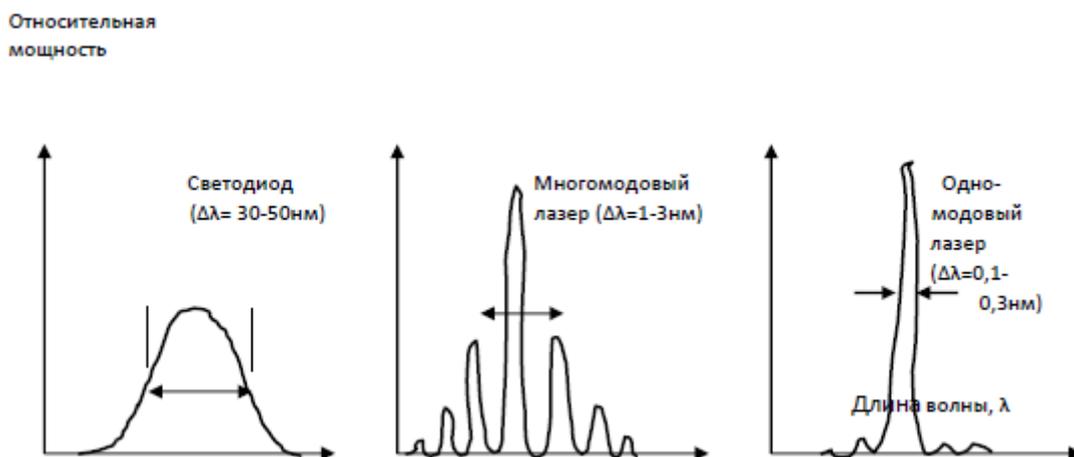


Рис. 26. Спектры излучения светодиодов и лазерных диодов

Главное отличие между светодиодами и лазерными диодами – это ширина спектра излучения. Светоизлучающие диоды имеют широкий спектр излучения, в то время как лазерные диоды имеют значительно более узкий спектр. Оба типа устройств весьма компактны и хорошо сопрягаются со стандартными электронными цепями.

Светоизлучающие диоды. Благодаря своей простоте и низкой стоимости, светодиоды распространены значительно шире, чем лазерные диоды.

Принцип работы светодиода основан на излучательной рекомбинации носителей в активной области гетерогенной структуры при пропускании через нее тока, рис 27,а. Носители заряда – электроны и дырки – проникают в активный слой (гетеропереход) из прилегающих пассивных слоев (р- и n- слоя) вследствие подачи напряжения на р-п структуру, где испытывают спонтанную рекомбинацию, сопровождающуюся излучением света.

Длина волны излучения λ (мкм) связана с шириной запрещенной зоны активного слоя E_g (эВ) законом сохранения энергии $\lambda = 1,24 / E_g$, рис. 27 б.

Показатель преломления активного слоя выше показателя преломления ограничивающих пассивных слоев, благодаря чему рекомбинационное излучение может распространяться в пределах активного слоя, испытывая многократное отражение, что значительно повышает КПД источника излучения.

Гетерогенные структуры могут создаваться на основе разных полупроводниковых материалов. Обычно в качестве подложки используются GaAs и InP. Соответствующий композиционный состав активного материала выбирается в зависимости от длины волны излучения и создается посредством напыления на подложку.

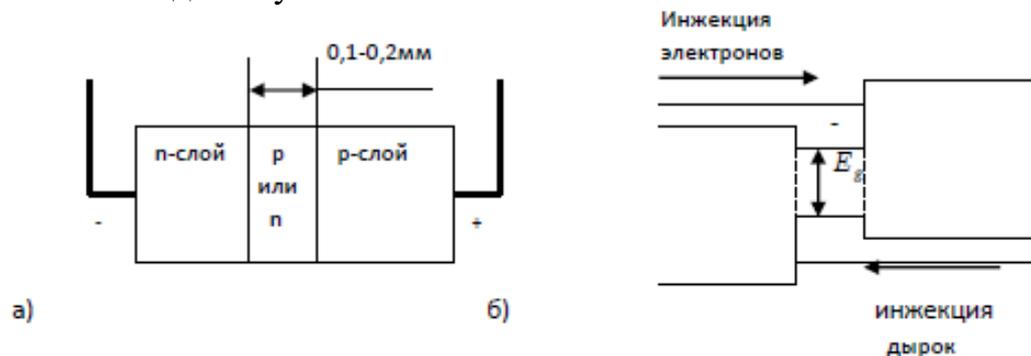


Рис. 27. Двойная гетероструктура: а) гетероструктура; б) энергетическая диаграмма при прямом смещении

Длину волны излучения λ_0 определяют как значение, соответствующее максимуму спектрального распределения мощности, а ширину спектра излучения $\Delta\lambda_{0,5}$ – как интервал длин волн, в котором спектральная плотность мощности составляет половину максимальной

Лазерные диоды. У лазерного диода по сравнению со светодиодом есть два главных отличия. Во-первых, лазерный диод имеет встроенный оптический резонатор, и, во-вторых, он работает при значительно больших значениях тока накачки, чем светодиод. Это позволяет при превышении некоторого порогового

значения получить режим индуцированного излучения. Именно такое излучение характеризуется высокой когерентностью, благодаря чему лазерные диоды имеют значительно меньшую ширину спектра излучения (1-2 нм) по сравнению (30-50 нм) со светодиодами, рис. 26.

Зависимость мощности излучения от тока накачки описывается ватт-амперной характеристикой. При малых токах накачки лазер испытывает слабое спонтанное излучение, работая как малоэффективный светодиод. При превышении некоторого порогового значения тока накачки $I_{пор}$ излучение становится индуцированным, что приводит к резкому росту мощности излучения и его когерентности, рис.28.

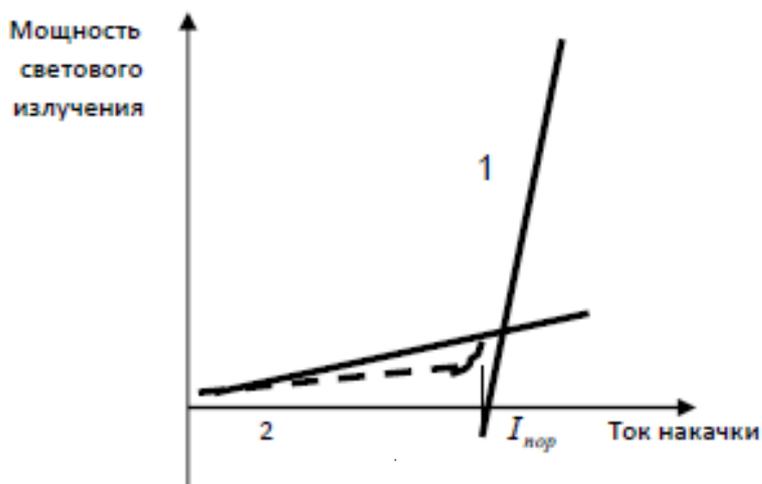


Рис. 28. Ватт-амперные характеристики: 1 – лазерного диода, 2 - светодиода

Мощность излучения светодиода или лазерного диода $P_{вых}$, вводимая в волокно, измеряется в мВт или дБм. Мощности, измеренной в мВт, будет соответствовать мощность $p_{вых} = 10 \lg P_{вых}$ (дБм). Использование единицы измерения дБм упрощает расчет энергетического бюджета волоконно-оптической линии.

В магистральных ВОСП и PON используются два окна 1,3 и 1,55 мкм. Поскольку наименьшее затухание в волокне достигается в окне 1,55 мкм, на сверхпротяженных регенерационных участках (порядка 100 км) эффективней использовать оптические передатчики именно с этой длиной волны. Однако, если на магистральной ВОСП и PON в состав ВОК входят только ступенчатые одномодовые волокна без смещенной дисперсии с минимумом хроматической дисперсии в окрестности 1,3 мкм, то величина их хроматической дисперсии на длине волны 1,55 мкм составляет 17 пс/нм.км. А поскольку полоса пропускания обратно пропорциональна ширине спектра излучения, то увеличить полосу пропускания можно только уменьшая ширину спектра излучения лазера. Так при ширине спектра $\Delta\lambda=4$ нм полоса пропускания на 100 км составит 63 МГц, а при $\Delta\lambda=0,2$ нм соответственно 1260 МГц. Поэтому для того, чтобы оптические передатчики на длине волны 1,55 мкм могли использоваться не только на протяженных линиях с одномодовым волокном со смещенной дисперсией

(DSF), но и с обычным ступенчатым волокном (SMF), ширину спектра излучения необходимо делать как можно меньше.

Наибольшее распространение получили четыре типа лазерных диодов: с резонатором Фабри – Перо, с распределенной обратной связью, с распределенным брэгговским отражением и с внешним резонатором.

Лазерные диоды с резонатором Фабри – Перо (FP лазеры). В таком лазерном диоде резонатор образуется торцевыми поверхностями, окружающими с обеих сторон гетеропереход. Одна из поверхностей отражает свет с коэффициентом отражения, близким к 100%, другая является полупрозрачной, обеспечивая, таким образом, выход излучения наружу.

Спектр излучения промышленного лазерного диода с использованием резонатора Фабри – Перо показан на рис.26 б. Как видно, наряду с главным пиком, в котором сосредоточена основная мощность излучения, существуют побочные максимумы. Их появление связано с условиями образования стоячих волн. Для усиления света определенной длины волны необходимо выполнение двух условий. Первое, длина волны должна удовлетворять соотношению $2D=N\lambda$, где D – диаметр резонатора Фабри – Перо, а N – некоторое целое число. Второе, длина волны должна попадать в диапазон, в пределах которого свет может усиливаться индуцированным излучением. Если этот диапазон достаточно мал, то имеет место одномодовый режим с шириной спектра меньше 1 нм. В противном случае в область $\Delta\lambda_{0,5}$ могут попасть два или более соседних максимумов, что соответствует многомодовому режиму с шириной спектра от одного до нескольких нм. FP лазер имеет далеко не самые высокие технические характеристики, но, когда не требуется очень высокая скорость передачи, он, вследствие более простой конструкции, наилучшим образом подходит с точки зрения цена – эффективность.

Лазерные диоды с распределенной обратной связью (DFB лазер) и с распределенным брэгговским отражением (DBR лазер). Резонаторы у этих двух довольно схожих типов представляют собой модификацию плоского резонатора Фабри – Перо, в которой добавлена периодическая пространственная модуляционная структура. В DFB лазерах периодическая структура совмещена с активной областью (рис.27 а), а в DBR лазерах периодическая структура вынесена за пределы активной области (рис.27 б). Периодическая структура влияет на условия распространения и тем самым на характеристики излучения. Так, преимуществами DFB и DBR лазеров по сравнению с FP лазером являются: уменьшение зависимости длины волны излучения лазера от тока инжекции и температуры, высокая стабильность одномодовости и практически 100% глубина модуляции. Температурный коэффициент $\Delta/\Delta T$ для FP лазера порядка 0,5-1 нм/ $^{\circ}\text{C}$, в то время как для DFB лазера порядка 0,07-0,09 нм/ $^{\circ}\text{C}$. Основным недостатком DFB и DBR лазеров является сложная технология изготовления и, как следствие, более высокая цена.

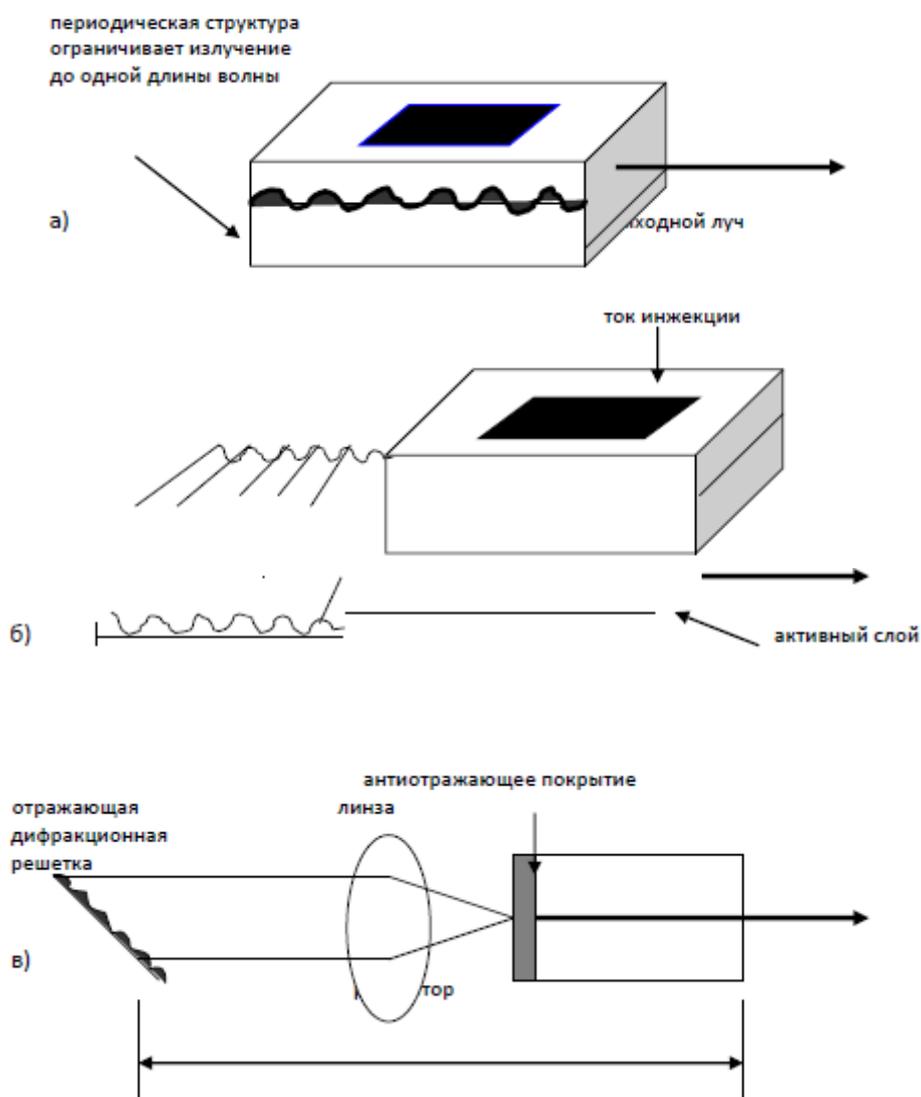


Рис.27. Три основных типа лазерных диодов с узкой шириной спектральной линии: а) лазер с распределенной обратной связью, DFB лазер; б) лазер с распределенным брэгговским отражением, DBR лазер; в) лазер с одним внешним резонатором, ЕС лазер

Лазерный диод с внешним резонатором (ЕС лазер). В ЕС лазерах один или оба торца покрываются специальным слоем, уменьшающим отражение, и соответственно, одно или два зеркала ставятся вокруг активной области полупроводниковой структуры. На рис. 27 в) показан пример ЕС лазера с одним внешним резонатором. Антиотражательное покрытие уменьшает коэффициент отражения примерно на четыре порядка, в то время как другой торец активного слоя отражает до 30% светового потока благодаря френелевскому отражению. Зеркало, как правило, совмещает функции дифракционной решетки. Для улучшения обратной связи между зеркалом и активным элементом устанавливается линза.

Увеличивая или уменьшая расстояние до зеркала, а также одновременно разворачивая зеркало-решетку, что эквивалентно изменению шага решетки, можно плавно изменять и время наработки на отказ.

Основные элементы ПОМ. Для организации передачи оптических сигналов не достаточно иметь только источник излучения. В любой конструкции ПОМ есть специальный держатель, который позволяет закрепить и защитить составные элементы передатчика: источник излучения, узел электрического интерфейса и место сопряжения с волокном. Важным элементом передающего модуля является цепь тока накачки с поддержанием уровня выходной мощности и система контроля температуры. Общая схема конструкции передающего оптического модуля, в которой не все элементы являются обязательными, приведена на рис. 28.

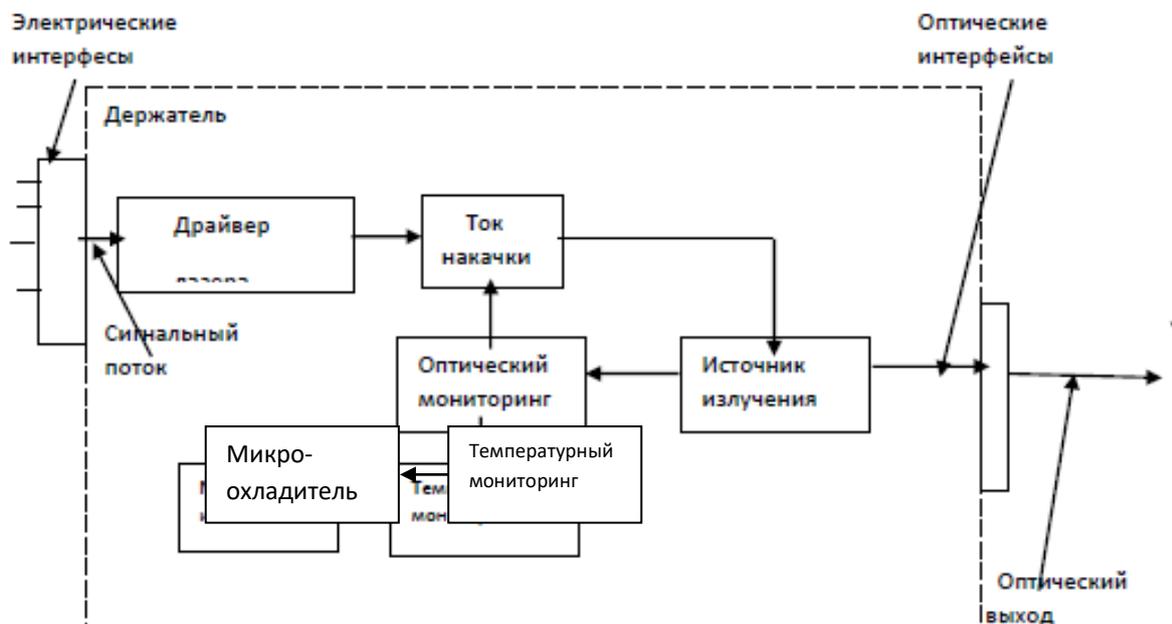


Рис. 28. Составляющие элементы передающего оптического модуля ПОМ

4.2. Приемные оптоэлектронные модули

Функцией приемных оптоэлектронных модулей (ПРОМ) является преобразование оптического сигнала, принятого из волокна, в электрический. Последний обрабатывается далее электронными устройствами.

Основные элементы приемных оптоэлектронных модулей. Основными функциональными элементами ПРОМ являются:

- фотоприемник, преобразующий полученный оптический сигнал в электрическую форму;
- электрический усилитель, усиливающий сигнал до уровня, пригодного к обработке;
- регенератор, воспроизводящий первоначальную форму сигнала.

В некоторых ПРОМ отсутствует цепь принятия решения, поскольку электрический сигнал с выхода усилителя приемлем для непосредственной обработки другими электронными устройствами. Иногда для более эффективной работы ПРОМ перед фотоприемником устанавливается оптический усилитель.

На рис. 29 приведены функциональные элементы аналогового а) и цифрового б) ПРОМ. Аналоговые ПРОМ принимают аналоговый оптический сигнал и на выходе также выдают аналоговый электрический сигнал. К аналоговым приемникам предъявляются требования высокой линейности преобразования и усиления сигнала при минимуме вносимых шумов. Это особенно важно на протяженных линиях с последовательным числом приемопередающих узлов, поскольку в этом случае искажения и шумы накапливаются.

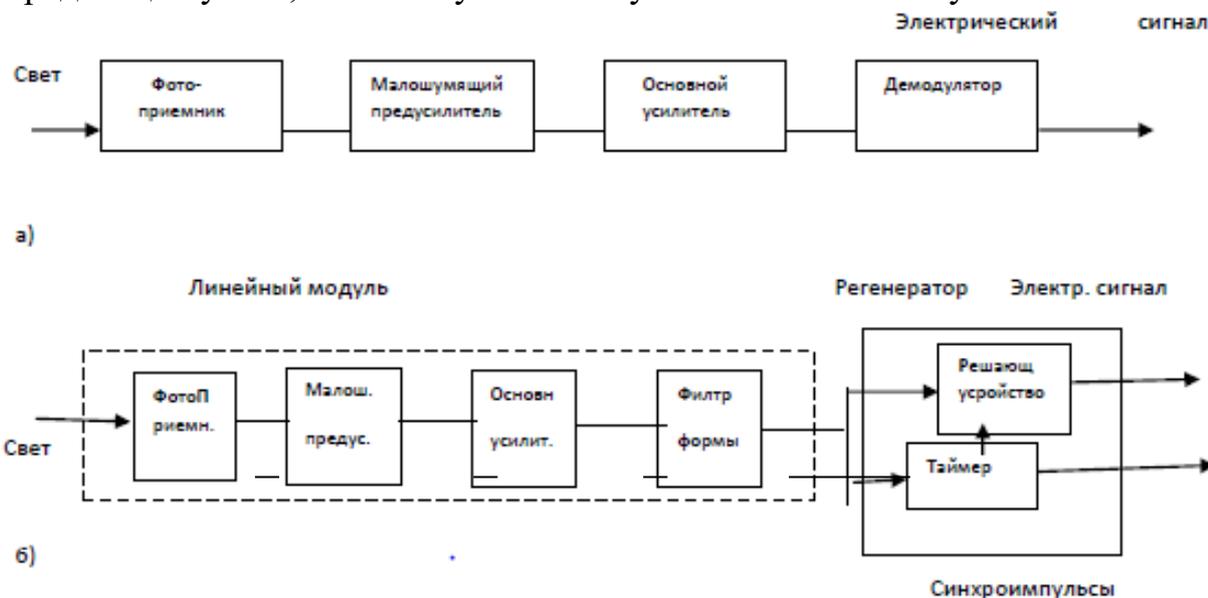


Рис. 29. Функциональные элементы приемных оптоэлектронных модулей ПРОМ: а) аналогового; б) цифрового

При цифровой передаче от аналоговой обработки сигнала не требуется восстановление точной формы импульсов. Цифровой приемник включает регенератор, содержащий решающее устройство с порогами, установленными на распознавание сигналов 0 и 1. Регенератор распознает, какой символ пришел, устраняет шумы и восстанавливает необходимую амплитуду сигнала. Правильное решение о приеме символа может происходить при относительно большом уровне шумов. Если требуется точное восстановление временных соотношений между импульсами, в состав регенератора включают выделитель тактовой частоты (таймер), который задает решающему устройству моменты принятия решения о приходе соответствующего символа (0 или 1).

Принципы работы фотоприемника. Основным элементом ПРОМ является фотоприемник, изготавливаемый из полупроводникового материала. В основе работы фотоприемника лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости (генерация электронно-дырочных пар). При наличии электрического потенциала с появлением электронно-дырочных пар от воздействия оптического сигнала появляется электрический ток, обусловленный движением электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Эффективная регистрация генерируемых в полупроводнике

электронно-дырочных пар обеспечивается путем разделения носителей заряда. Для этого используется конструкция с р-п переходом, которая называется фотодиодом. Из фотоприемников, применяемых в ВОСП, наибольшее распространение получили р-і-п фотодиоды.

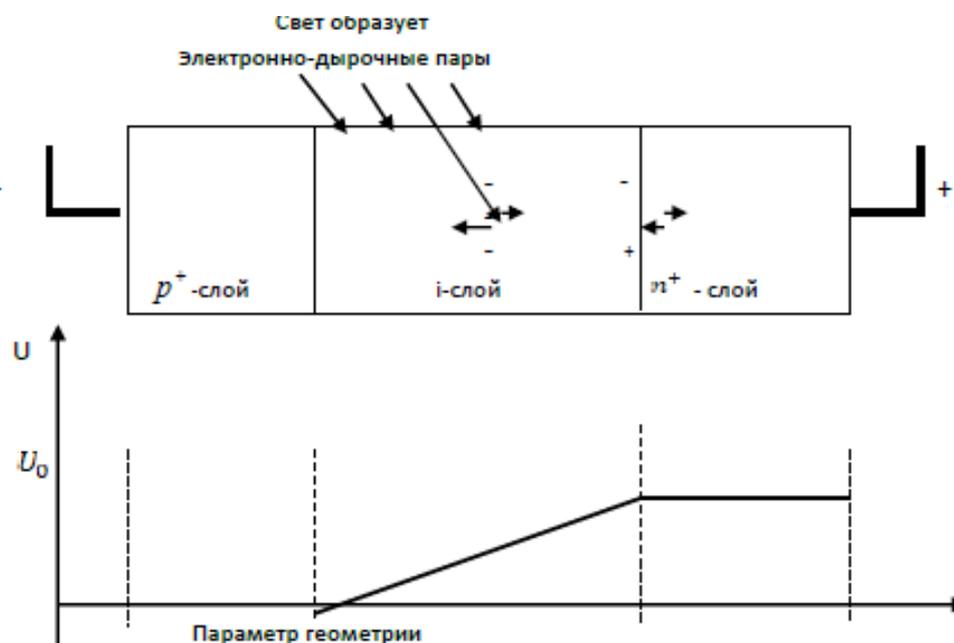


Рис. 30. Структура, включение и распределение потенциала р-і-п фотодиода

Рассмотрим принцип работы фотоприемника на основе р-і-п фотодиода, для которого характерно наличие і-слоя (слаболегированного полупроводника n-типа) между слоями p^+ и n^+ - типа (+ означает сильное легирование), рис.30. Также і-слой называют обедненным слоем, поскольку в нем нет свободных носителей. На р-і-п структуру подается напряжение с обратным смещением U_0 (по сравнению со светоизлучающим диодом). Сильное легирование крайних слоев делает их проводящими, и максимальное значение электрического поля (градиент потенциала) создается в і-слое. Но поскольку там нет свободных носителей, нет и электрического тока, так что і-слой испытывает только поляризацию. При наличии падающего излучения на і-слой, в нем образуются свободные электронно-дырочные пары. Они под действием электрического поля быстро разделяются и двигаются в противоположных направлениях к своим электродам, образуя электрический ток. Эффективным является взаимодействие излучения только с і-слоем, так как при попадании фотонов в p^+ и n^+ -слои возникает диффузионный ток, который имеет большую инерционность и ухудшает быстродействие. Поэтому при изготовлении фотодиодов стремятся делать p^+ и n^+ -слои как можно тоньше, а обедненную область достаточно большой протяженности, чтобы она полностью поглощала весь падающий свет.

Эффективность (квантовая) обедненной области в рабочем диапазоне длин волн достаточно высока – порядка 80-100%. Однако часть падающего излучения испытывает френелевское отражение от фоточувствительной

поверхности из-за скачка показателей преломления на границе между этой поверхностью и средой. Для уменьшения отражения приемную поверхность обедненного слоя покрывают специальным антиотражающим слоем.

Технические характеристики фотоприемников. Основными техническими характеристиками, которые интересуют разработчика при выборе фотоприемника для конкретной ВОСП, являются: широкополосность, соотношение сигнал/шум и чувствительность для аналоговой системы передачи; быстродействие, частота появления ошибок и чувствительность для цифровых систем передачи. На самом деле они зависят от таких характеристик фотодиода и приемного модуля, как: токовая чувствительность, квантовая эффективность, темновой ток, эквивалентная мощность шума, время нарастания и спада, насыщение. Важными параметрами являются также максимально допустимое обратное напряжение, рабочий диапазон температур, наработка на отказ.

Токовая чувствительность (монохроматическая) S_{ph} (А/Вт) определяется как $S_{ph} = I_{ph} / P(\lambda)$, где I_{ph} - фототок, а $P(\lambda)$ - полная оптическая мощность излучения на длине волны λ , падающего на фоточувствительную площадку. Токовая чувствительность характеризует фотоприемник при низких частотах модуляции.

Квантовая эффективность η (безразмерная величина) определяется как $\eta = N_e / N_{ph}$, где N_{ph} - количество фотонов, падающих за единицу времени на приемник, а N_e - количество рожденных в результате этого свободных электронов (или электронно-дырочных пар). Квантовая эффективность для р-і-п фотодиодов не может быть больше 1 (100%).

Между токовой чувствительностью и квантовой эффективностью существует простая связь $S_{ph} = \frac{e\lambda}{hc} \eta$, где e - заряд электрона ($1,60 \cdot 10^{-19}$ К), λ - длина волны, h - постоянная Планка ($6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж.сек), c - скорость света ($3,00 \cdot 10^8$ м.сек⁻¹). С подстановкой значений констант получаем $S_{ph} = \frac{\lambda}{1,24} \eta$. Типичное значение токовой чувствительности для р-і-п фотодиодов в их рабочих диапазонах составляет 0,5-0,8 А/Вт.

Характеристики η и S_{ph} используют при создании приемных модулей ПРОМ, когда требуется согласовать фотодиод с предусилителем.

Темновой ток I_d (А) протекает при обратном смещении через нагрузку в отсутствие падающего на фотодиод излучения. Его величина зависит от материала полупроводника, температуры окружающей среды и конструкции фотоприемника. Этот ток добавляется к току полезного сигнала, когда на фотодиод поступает свет.

Для описания шумовых характеристик приемника используются еще два шумовых тока: дробовой ток I_{sn} - для р-і-п фотодиода $I_{sn} = (2eI_d B)^{1/2}$, где e - заряд электрона, I_d - темновой ток, B - полоса пропускания (частота

модуляции); и тепловой Джонсоновский ток $I_{jn} = (4КТВ)^{1/2}$, где К – постоянная Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$ ДжК⁻¹), Т – абсолютная температура (К), В – полоса пропускания, R – сопротивление (Ом). Полный шумовой ток I_n определяется, как среднее квадратичное дробового и теплового тока $I_n = (I_{sn}^2 + I_{jn}^2)^{1/2}$.

Эквивалентная мощность шума P_n (Вт) – одна из наиболее важных характеристик, учитывающих шумовые свойства фотоприемников. Она определяет минимальную мощность оптического сигнала на входе фотоприемника, при которой отношение сигнал/шум равно единице, и вычисляется по формуле $P_n = I_n^2 / S_{ph}$, где I_n – полный шумовой ток. По определению, эквивалентная мощность шума пропорциональна квадратному корню из полосы пропускания. P_n можно нормировать, поделив на \sqrt{B} . Такая нормированная эквивалентная мощность шума имеет размерность Вт/Гц^{1/2} и не зависит от полосы пропускания.

Время нарастания (спада) τ – это самая важная динамическая характеристика фотоприемника. Она определяется как время, необходимое выходному сигналу, чтобы возрасти от уровня 0,1 до 0,9 (упасть от 0,9 до 0,1) от установившегося максимального значения при условии, что на вход подаются прямоугольные импульсы света большой длительности. Эти времена зависят от геометрии светодиода, материала, напряженности электрического поля в слаболегированной области, температуры. С увеличением частоты модуляции входных оптических импульсов максимальное значение фототока уменьшается. Предельная частота определяется как частота модуляции, при которой токовая чувствительность составляет 0,707 от значения токовой чувствительности при низких частотах модуляции. Различные фотоприемники могут сильно отличаться по быстродействию. Наиболее быстрыми являются р-і-п фотодиоды.

Главная функция фотоприемника – это как можно более точное воспроизведение оптического сигнала, поступающего из волокна. Насколько хорошо фотоприемник справляется с этой задачей зависит от амплитуды входного сигнала и уровня шумов, то есть от отношения сигнал/шум. Соотношение сигнал/шум и чувствительность аналоговых систем передачи. Для аналоговых систем отношение сигнал/шум измеряется количественно. Требуемая величина соотношения сигнал/шум зависит от применения – для одних систем допустимым соотношением может быть величина 50-60 дБ, для других – 30 дБ. Зная P_n и требования к отношению сигнал/шум, можно определить минимальный входной сигнал $P_{смин}$ – чувствительность аналогового ПРОМ, при котором вносимые шумы будут в пределах нормы. Если входной сигнал ниже чувствительности приемника, то соотношение сигнал шум не будет достаточным для конкретного применения. Принятой единицей измерения чувствительности является дБм. Коэффициент ошибок и чувствительность цифровых систем. В цифровых системах передачи, когда информация передается двоичными символами, мерой качества принятого

сигнала является вероятность некорректной передачи 0 или 1, которая измеряется частотой или коэффициентом ошибок. Она определяется как отношение неправильно принятых символов к их полному числу. Коэффициент ошибок очень резко зависит от мощности входного сигнала, рис.31. В определенном диапазоне уменьшение на 0,5 дБ амплитуды входного сигнала приводит к увеличению коэффициента ошибок на порядок. В цифровых телекоммуникационных системах частота появления ошибок должна быть не больше 10^{-9} . В вычислительных сетях требования к коэффициенту ошибок более высокие -10^{-12} .

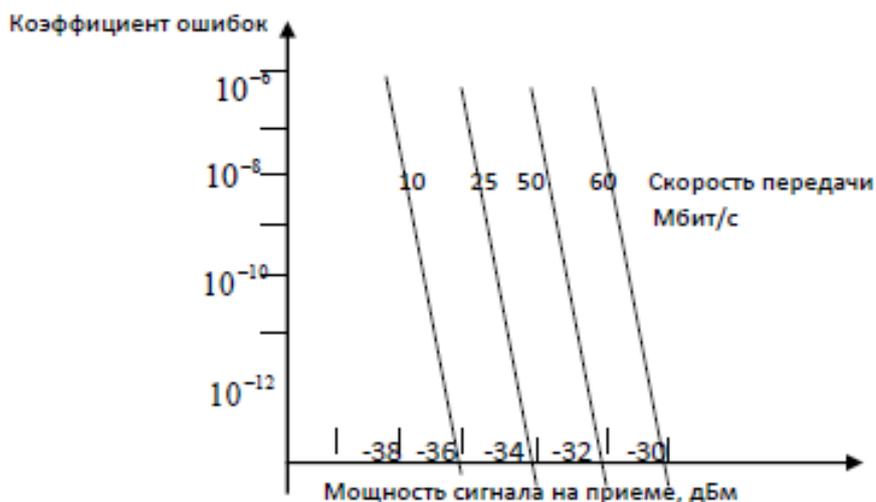


Рис. 31. Коэффициент ошибок как функция мощности

Чувствительностью цифрового ПРОМ называется минимальная мощность входного сигнала, при которой достигается заданный для данной системы передачи коэффициент ошибок. Для нормальной работы мощность оптического сигнала на входе должна быть не меньше чувствительности ПРОМ. Чувствительность цифровых приемников также измеряют в дБм.

Насыщение ПРОМ. Электронные усилители приемника имеют линейную зависимость амплитуды выходного электрического сигнала от входной оптической мощности. Это справедливо до тех пор, пока входной сигнал не превышает определенного значения, которое называется насыщением ПРОМ. В цифровых приемниках, в отличие от аналоговых, работа усилителей в нелинейной области не так опасна. Однако при больших входных сигналах нулевые символы следующие непосредственно за единицей, из-за «хвостов» фототока, вызванных нелинейностью, могут неправильно определяться, что приведет к увеличению коэффициента ошибок. Насыщением цифрового ПРОМ называется максимальная входная мощность, при которой, коэффициент ошибок начинает превышать заданную величину. Диапазон значений мощности от чувствительности до насыщения называется динамическим диапазоном ПРОМ.

Максимально допустимое обратное напряжение U_r - это напряжение, превышение которого может привести к пробое фотоприемника и его разрушению.

4.3. Оптические усилители

В некоторых случаях в пассивных оптических сетях используются оптические усилители. Оптический усилитель является активным компонентом, усиливающим оптический сигнал непосредственно без промежуточного оптоэлектронного преобразования. Усилители, как правило, используются на концах канала связи, особенно, если на этих концах установлены сплиттеры с большим коэффициентом деления. Усилители могут устанавливаться также в промежуточных точках очень длинных трасс.

При пассивной оптической инфраструктуре сети установка оптических усилителей в оптическую сеть распределения противоречит пассивной оптической инфраструктуре сети, но в случае необходимости увеличения дальности связи или коэффициента деления оптические усилители используются и в оптической сети распределения. Оптический предусилитель устанавливается на удаленном узле на общем волокне перед сплиттером и выступает в роли удлинителя оптической линии (Range Extender – RE). Для отдельных пользователей использование оптического усилителя не предусмотрено, поскольку это в значительной степени увеличивает стоимость ONU/Т. Таким образом, наиболее логично устанавливать усилители на станции, где они будут выполнять функцию усиления мощности на передающей стороне.

По принципу работы оптические усилители делятся на усилители с вынужденной эмиссией света и усилители с вынужденным рассеянием света. К первой группе относятся полупроводниковые и волоконные усилители, являющиеся дискретными, а ко второй – усилители Рамана и Бриллюэна, являющиеся распределенными.

При усилении во всех случаях к исходящему оптическому сигналу добавляется шум. Этот вносимый шум создается в процессе усиления и от него невозможно полностью избавиться. Поскольку шум вреден с системной точки зрения, за усилителями применяются фильтры, частично улучшающие свойства системы.

Усилитель Бриллюэна по своей натуре является очень узкополосным и с этой точки зрения не подходит для усиления сигналов в PON. Усиление Рамана основано на нелинейном явлении вынужденного рассеяния Рамана. Усиление достигается путем нелинейного взаимодействия сигнала с лазером накачки внутри оптического волокна на протяжении всей длины волокна. Основным преимуществом усилителей Рамана является возможность их использования для распределенного усиления. При распределенном усилении Рамана оптическое волокно используется в качестве среды усиления с мультиплексированием длины волны накачки и длины волны сигнала. Преимущество заключается в обеспечении распределенного усиления внутри волокна, в результате чего увеличивается дальность действия или коэффициент деления. В случае использования усилителя Рамана оптическая сеть распределения остается пассивной.

Полупроводниковый оптический усилитель (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) представляет собой оптоэлектронное устройство, реализованное на базе вынужденной эмиссии света в полупроводнике. В качестве полупроводника чаще всего используется фосфат индия (InP). Активный волновод должен быть тщательно спроектирован (InGaAsP) с множественными квантовыми ямами (Multiple Quantum Wells – MQW) для обеспечения требуемой энергетической полосы (Bandgap) и вместе с тем независимости от поляризации. Полупроводниковый оптический усилитель представляет собой очень маленькое и компактное устройство. По строению он похож на диод лазера Фабри-Перо (см. Рис. 32). Существенная разница между SOA и лазером FP заключается в антиотражающем слое, снижающем обратное отражение внутри усилителя. Активная область внутри световода обеспечивает усиление оптического сигнала. Источником энергии, обеспечивающим усиление, является внешний электрический ток (управляющий ток).

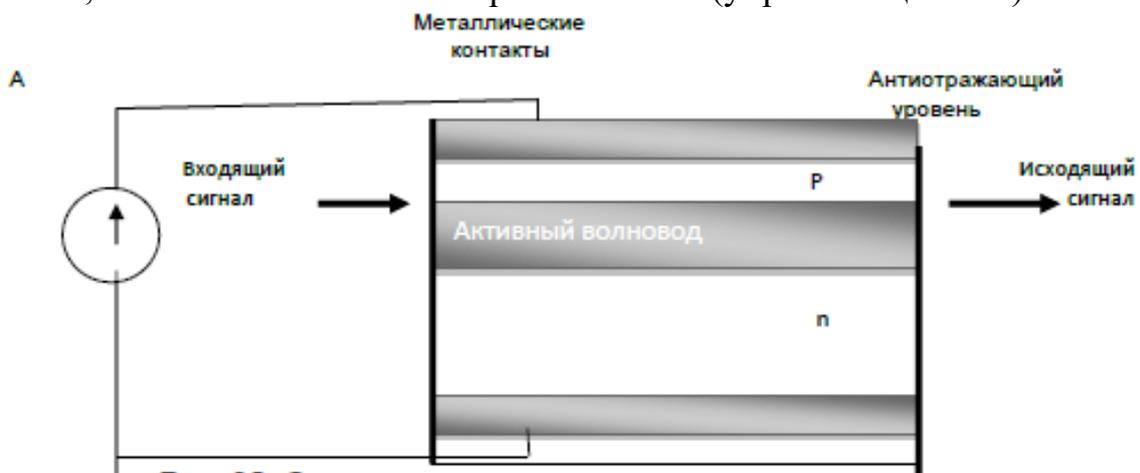


Рис. 32. Строение полупроводникового оптического усилителя

Усиление вызывается накачкой электрическим током. В полупроводнике происходит спонтанная или вынужденная рекомбинация электронов дырок, приводящая к эмиссии света. В случае вынужденной рекомбинации электронов и дырок происходит усиление сигнала, а при спонтанной рекомбинации генерируется шум. Энергия фотона соответствует разнице энергии между проводящим и валентным слоями, поэтому полупроводники для изготовления усилителя должны выбираться в соответствии с требуемым диапазоном усиления. Полупроводниковые оптические усилители могут усиливать широкий спектр длин волн, зависящий от разницы энергетических уровней выбранных материалов. В рамках слоя 20 нм может выполняться усиление до 15 дБ, что меньше, чем у волоконных усилителей. К недостаткам полупроводниковых оптических усилителей относятся зависимость от поляризации, потери на соединениях между волокном и полупроводником, большое количество шума и нелинейные явления, возникающие в полупроводнике. Несмотря на это, полупроводниковые усилители подходят для увеличения дальности действия на длинах волн 1310 и 1490 нм.

Легированные волоконные усилители (Doped Fiber Amplifiers – DFA) представляют собой оптические усилители, использующие стеклянное оптическое волокно с активными примесями в качестве среды для усиления оптического сигнала. В качестве примесей могут использоваться ионы редкоземельных элементов или ионы переходных металлов. Как правило, они являются 3-валентными (например, Er^{3+}) и заменяют другие ионы в среде (подобные по размеру и валентности).

Компонентами типового DFA являются обогащенное (легированное) оптическое волокно, лазеры накачки, направленные ответвители, изоляторы и фильтр (Рис. 33). Сигнал для усиления и лазер накачки соединяются с легированным оптическим волокном посредством направленного ответвителя. Самым важным компонентом оптического волоконного усилителя является волокно длиной примерно 10 м с очень тонкой сердцевиной (6 мкм), обогащенной ионами эрбия Er^{3+} . Полученный исходящий сигнал усиливается посредством взаимодействия света из лазеров накачки и легированными ионами.

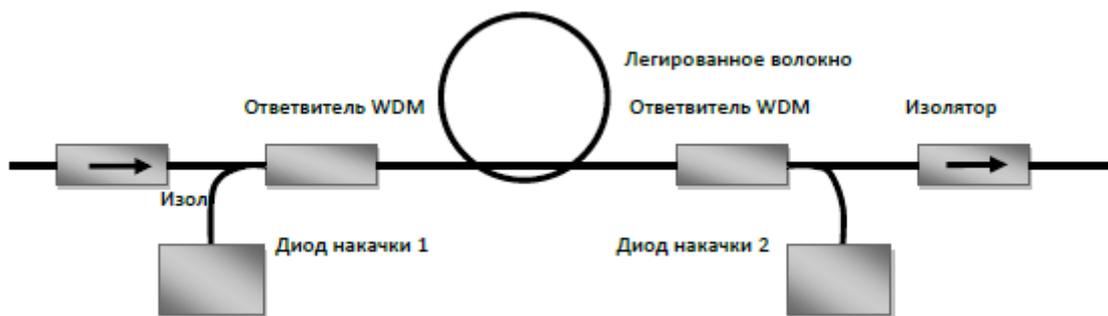


Рис 33. Компоненты типового DFA

Принцип работы легированного волоконного усилителя основан на переходе ионов между уровнями или энергетическими состояниями на основе накачки света, вынужденного излучения и спонтанного распада (см Рис.34). Свет из лазера накачки возбуждает легированные ионы до наивысшего энергетического состояния, то есть состояния инверсной населенности на энергетических уровнях. В процессе вынужденного излучения ион переходит в более низкое энергетическое состояние и при этом отдает фотон с такой же фазой, направлением распространения и поляризацией, как и поступивший фотон. Кроме перехода с помощью вынужденного излучения ион может перейти в более низкое энергетическое состояние также при помощи спонтанного излучения, при котором фотон отдается в произвольном направлении, или посредством взаимодействия с фотонами. Эти два механизма уменьшают КПД усилителя.

Несмотря на то, что энергетические уровни отдельного иона хорошо разделены, усилители имеют гораздо более широкое окно усиления, диапазон длин волн, усиливаемых после прохода через усилитель. Расширение происходит из-за включения ионов в оптическое волокно. Такое расширение может быть гомогенным (одинаковым для всех ионов) или негомогенным

(ионы на различных позициях имеют различные спектры). Гомогенное расширение возникает из-за взаимодействия с фононами, а неггомогенное из-за различных соединений ионов со стеклом.

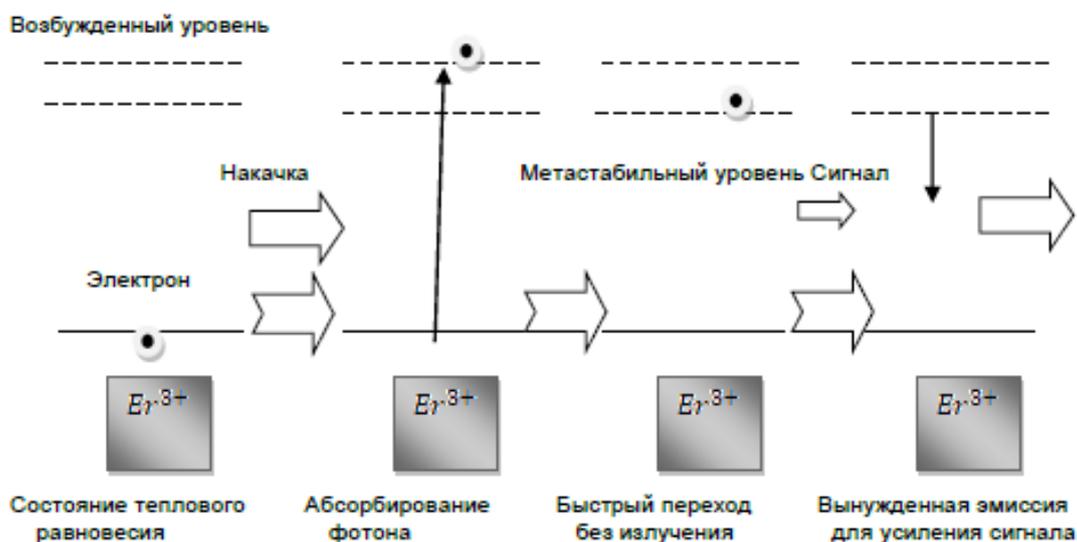


Рис. 34. Принцип перехода ионов между уровнями или энергетическими состояниями

Примером усилителя на основе легированного волокна является легированный волоконный усилитель с примесью эрбия (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA) в котором сердцевина кремниевого волокна обогащена трехвалентными ионами эрбия, а для накачки используется лазер с длиной волны 980 нм или 1480 нм. Все это обеспечивает усиление на длинах волн около 1550 нм. Ввиду упомянутых расширений спектр достаточно широк, около 40 нм, что подходит для усиления сигналов с различными длинами волн.

Ионы эрбия переносятся на высшие энергетические уровни посредством сигнала накачки. В качестве лазера накачки используется оптический источник на длине волны 1480 нм или 980 нм, причем ионы эрбия переносятся на первый или второй возбужденный уровень. При переходе частичек из метастабильного состояния на основной уровень возникает вынужденная эмиссия (или сигнал) и спонтанная эмиссия (или шум) света в диапазоне 1550 нм.

Усиление EDFA, как правило, составляет от 30 дБ до 40 дБ и в большей степени не зависит от поляризации. Процесс усиления распределен по всей длине активного волокна. Вместе с полезным сигналом усилитель также усиливает собственный шум, являющийся результатом спонтанной эмиссии в активной части волокна, что является единственным недостатком

5. Технология PON

5.1. Планирование физического уровня пассивной оптической сети

Планирование физического уровня системы PON производится на основе количества пользователей и дальности действия. Число абонентов, то есть число ответвлений и дальность действия PON являются противоположными задачами. При увеличении одного фактора ограничивается другой.

По стандарту имеется три типа дальности действия: физическая дальность действия (physical reach), логическая дальность действия (logical reach) и дифференциальная дальность действия (differential reach). **Физическая дальность действия** представляет собой физическую длину, определяемую на основании баланса мощности (Power Budget) отдельного соединения. **Логическая дальность действия** определяется на основе протокола для настройки сети. Конвергентный уровень передачи GPON (GPON Transmission convergence layer – GTC) позволяет иметь 128 ответвлений и дальность действия до 60 км, однако на практике используется не более 32 ответвлений и дальность действия до 20 км. **Дифференциальная дальность действия** представляет собой физическую или логическую разницу между самым удаленным и самым ближним модулями ONU/T.

Когда определяется физическая дальность действия и коэффициент деления PON при заданной выходной мощности лазера и чувствительности приемника необходимо учитывать баланс мощности. Последний, в свою очередь, зависит от затухания на отдельных элементах оптической сети распространения.

Сигнал, поступающий по оптической распределительной сети в детектор, должен быть достаточно мощным для правильного определения. Это обеспечивается тогда, когда поступающий в детектор сигнал намного мощнее шума в приемнике. Мощность сигнала P_r , поступающего в детектор, должна быть больше определенного уровня, называемого чувствительностью приемника P_s (receiver sensitivity). Чувствительность приемника представляет собой мощность сигнала в дБм при определенном числе неправильно принятых битов (Bit Error rate – BER). Для GPON значение BER выбрано таким образом, что позволяет иметь одну ошибку на 10^{10} переданных бит, то есть значение BER составляет 10^{-10} . В EPON это требование еще более строгое и составляет 10^{-12} .

Кроме чувствительности приемника, определяемой минимальной мощностью, необходимой для приема с определенным количеством неправильно принятых бит, для приемника также определяется допустимая оптическая мощность, переводящая приемник в состояние насыщения. Отношение между максимальной допустимой мощностью и минимальной необходимой мощностью называется динамическим диапазоном приемника. Когда приемник получает сигнал больше мощности, чем разрешено, он

перестает правильно работать. Это может произойти, если пользователь находится близко к станции.

Распределение потерь мощности по элементам соединения называется балансом мощности (Power Budget) или системным балансом. Баланс мощности представляет собой разницу между переданной и принятой мощностью (Рис. 35). При планировании системы с максимальным резервом балансом мощности является разница между минимальной передаваемой мощностью лазера и максимальной мощностью приемника.

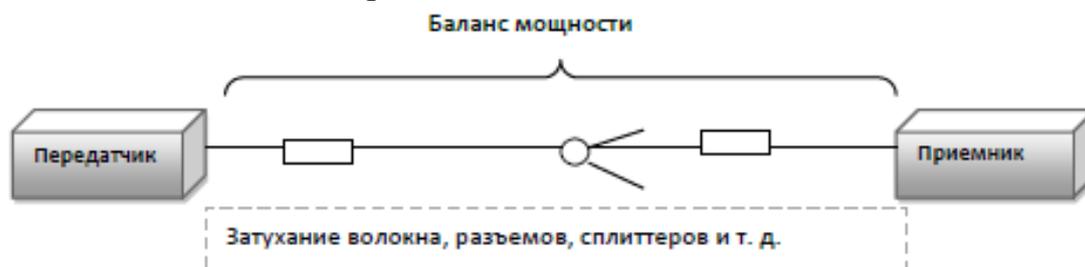


Рис 35. Баланс мощности в оптической распределительной сети

Принимаемая фотоприемником мощность зависит от следующих факторов:

- выходная мощность источника света (лазерного диода) $P_{л}$;
- потери на соединение между лазером и волокном $L_{лв}$;
- потери в волокне на км $L_{в}$ для определенной длины волокна L ;
- потери в соединениях и разъемах $L_{ср}$;
- потери из-за коэффициента деления $L_{д}$;
- потери из-за затухания сплиттера $L_{сз}$;
- потери на соединение между волокном и детектором $L_{вд}$.

В GPON стандартизованы различные классы оптической сети распределения (Optical Distribution Network – ODN), приведенные в Табл. Для обеспечения максимального баланса мощности для классов В,С и D необходимо использовать чувствительные лавинные фотодиоды (APD) вместо дешевых PIN диодов.

Класс	Максимальный баланс мощности
A	20 дБ
B	25 дБ
B+	28 дБ
C	30 дБ
C+	32 дБ
D	35дБ

Если известно соотношение между коэффициентом деления и дальностью действия, можно определить пороговые значения для каждого класса (для волокна с затуханием 0,4 дБ/км (Рис 36)).

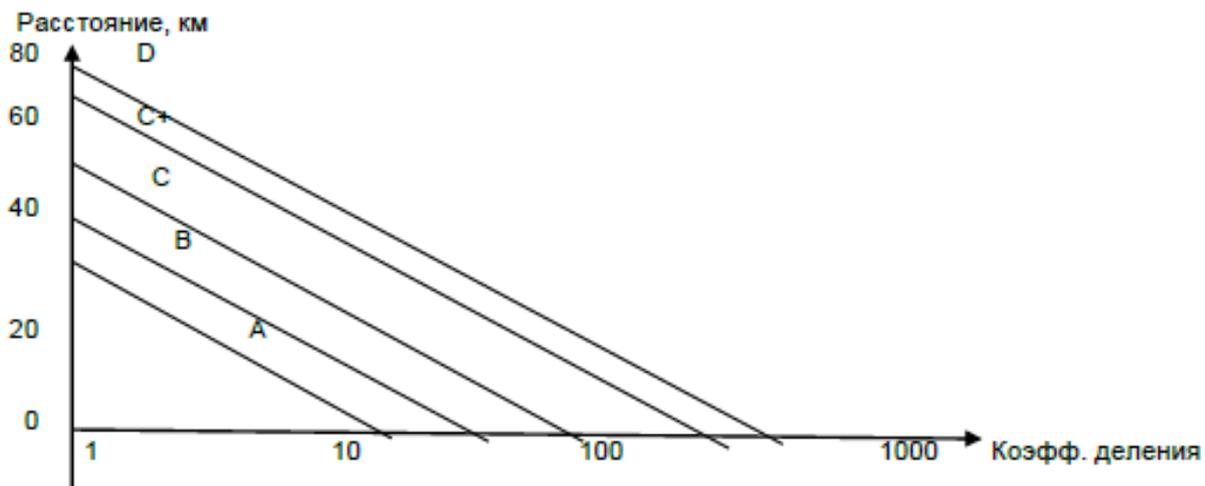


Рис. 36. Дальность действия и коэффициент деления для различных балансов мощности

Поскольку оптическая сеть доступа строится на 20 – 30 лет, имеет смысл зарезервировать как минимум 2 дБ баланса мощности. Оптимальный резерв составляет 8 -10 дБ. Резерв определяется как запас мощности (Power Margin) в системе. Запас мощности – это разница между фактической мощностью на входе приемника и его чувствительностью. Резерв в виде запаса мощности должен учитываться из практических соображений. Среди этих влияющих причин можно выделить старение лазеров и остальных оптических компонентов, резерв для дополнительных соединений в случае повреждения сети, возможную потребность в расширении сети, возможность модернизации.

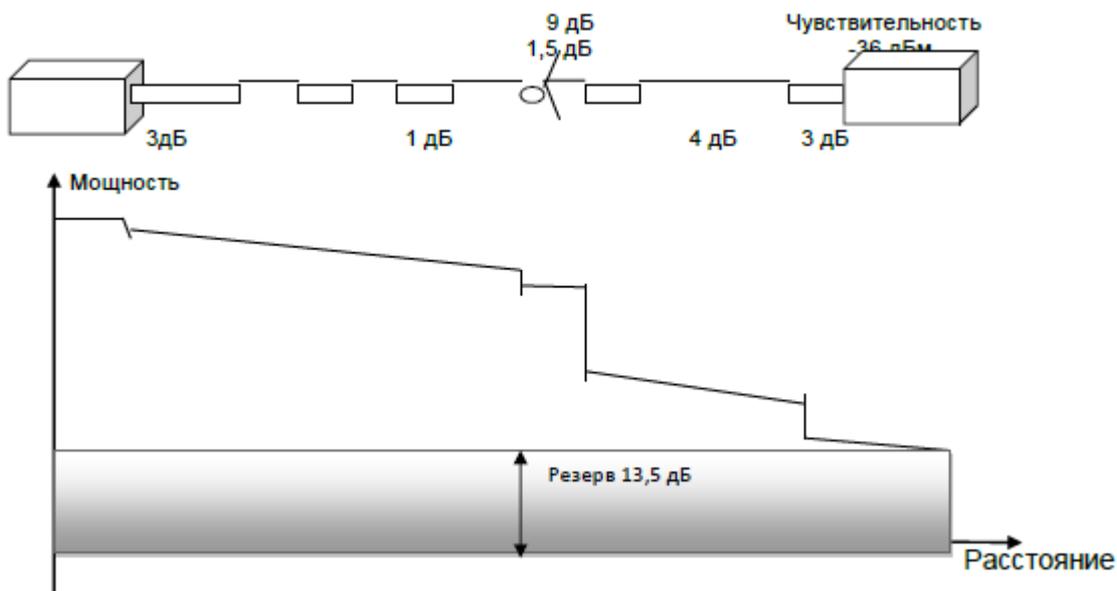


Рис. 37. Графическое отображение запаса мощности в PON

Пример: графическое отображение запаса мощности в PON со следующими характеристиками (Рис.37):

- выходная мощность источника света (лазерного диода) $P_l = 2$ мВт (3 дБм)
- потери на соединении между лазером и волокном $L_{dB} = 3$ дБ
- потери волокна на км длины $L_g = 0,4$ дБ/км
- длина волокна $L = 20$ км
- потери соединений и разъемов $L_{cm} = 1$ дБ

- потери из-за коэффициента деления 1:8 $L_{сп} = 9$ дБ
- потери из-за затухания сплиттера $L_{сз} = 1,5$ дБ
- потери на соединении между волокном и детектором $L_{сд} = 3$ дБ
- чувствительность приемника $P_{п} = -36$ дБ

5.2. Передача видеосигнала

Видеосигнал может передаваться по пассивной оптической сети посредством IP-пакетов или с помощью передачи аналоговой радиочастоты. Выбор того или другого варианта сильно сказывается на реализации всей пассивной оптической сети.

В первом случае поток данных сжимается с использованием соответствующего формата (MPEG-2, MPEG-4), разбивается и упаковывается в IP-пакеты. На стороне пользователя изображение восстанавливается. Для приема цифрового видеосигнала необходима ТВ-приставка (Set Top Box – STB), которая расшифровывает каналы. Такое телевидение получило название IPTV (Internet Protocol TV). IP-видео передается вместе с остальными данными по волокну между станцией и пользователем на длине волны 1490 нм.

Передача аналогового РЧ-видеосигнала по оптическому волокну уже в течение долгого времени используется в первую очередь операторами кабельных сетей. На первый взгляд данная технология является устаревшей и, по мнению некоторых специалистов, не относится к современным оптическим сетям доступа, где распределение видеосигнала может обеспечиваться более дешевой технологией IPTV. Однако, не стоит думать, что передача видеосигнала с помощью поднесущих является очень простой системой, обеспечивающей очень качественную и эффективную одностороннюю систему передачи телевизионных сигналов большому числу пользователей. Преимущество использования радиочастотного распределения видео заключается в простом приеме и независимом от оператора делении телевизионного сигнала между несколькими ТВ-приемниками в рамках жилища пользователя. Передача видео с помощью РЧ-сигнальных поднесущих обеспечивает разграничение аналогового и цифрового видеоконтента. Аналоговый видеосигнал использует амплитудную модуляцию (АМ) РЧ-несущей, а цифровой сигнал – квадратурную амплитудную модуляцию (m-QAM) РЧ-несущей. Наиболее часто используется 64-QAM или 256-QAM модуляция. На станции кроме OLT, обеспечивающего прием и передачу цифровых данных, также находится модуль разделения РЧ-видеосигнала, называемый видео OLT. Структура видео OLT показана на Рис. 38. При разделении по поднесущим (SubCarrier Multiple Access – SWCMA) видеоконтент сначала модулируется на радиочастотные поднесущие в частотном диапазоне от 50 МГц до 550 МГц. Частота отдельной поднесущей определяется локальным осциллятором (LO). Различные частотные поднесущие затем объединяются и модулируются на оптическую несущую. Оптическая прямая модуляция обычно выполняется с помощью внешнего модулятора,

характеристика которого должна быть как можно более линейной, чтобы предотвратить искажение видеосигнала при модуляции. Таким образом, каждый поток данных занимает свою часть оптического спектра вокруг центральной частоты оптической несущей. При передаче РЧ-видео по сети PON требуется большая выходная мощность по сравнению с передачей данных, поскольку необходимо компенсировать потери в волокне и доставить сигнал большому числу пользователей. Для приема аналогового видеосигнала необходимо увеличенное соотношение сигнал/шум, поэтому всегда используется длина волны 1550 нм, поскольку оптоволокно в этом диапазоне имеет минимальное затухание, а перед передачей эту длину волны можно усилить с помощью эрбиевого оптического усилителя (EDFA). Поскольку аналоговый видеосигнал очень чувствителен к интерферометрическому шуму, его возникновение необходимо предотвратить. Для этого используются оптические разъемы с малым обратным отражением, то есть с полировкой под углом (Angled Physical Contact – APC). Для приема аналогового видеосигнала через сеть PON пользователю необходимо лишь подключить телевизор к ONT. В ONT имеется фотодиод, детектирующий оптический сигнал. При этом выполняется преобразование оптического сигнала SCM в последовательность радиочастотных поднесущих, поступающих на стандартный коаксиальный порт 75 Ом. Затем телевизор просто настраивается на поднесущую с желаемым видеоконтентом. Критическим параметром передачи аналогового видеосигнала является соотношение между несущей и шумом (Carrier to Noise Ratio – CNR) для принимаемого ONT сигнала. Минимальное значение для CNR составляет 44 дБ, однако оно должно быть не менее 47 дБ, чтобы устранить «рябь» на изображении. Многие операторы используют как минимум 46 дБ или 48 дБ для CNR. Для получения CNR 48 дБ необходимо иметь на фотодиоде приемника как минимум -6 дБм оптической мощности.

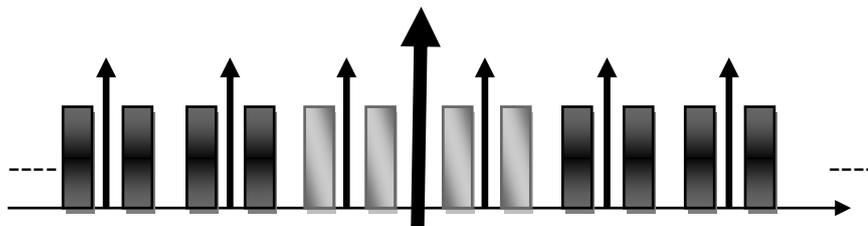


Рис.38. Передача видеосигнала по волокну с разделением на РЧ-поднесущие

Основным ограничивающим фактором при увеличении оптического коэффициента деления является вынужденное рассеяние Бриллюэна (Simulated Brillouin Scattering – SBS) из-за слишком высокой оптической мощности на стороне OLT. Феномен SBS возникает в том случае, если по оптическому волокну длиной свыше нескольких км передается оптический сигнал большой мощности. SBS приводит к тому, что часть переданной оптической мощности из сигнала преобразуется обратно в рассеянный свет, представляющий собой шум в системе передачи. Уменьшение шума на приемнике означает

уменьшение CNR и, следовательно, понижение качества передаваемого аналогового изображения.

Вынужденное рассеяние Бриллюэна является особо вредным для передачи аналоговых телевизионных сигналов. Стандартные видеопередатчики, в которых используются системы для уменьшения SBS, достигают выходной мощности от 16 дБм до 20 дБм и обеспечивают передачу на расстояние свыше 50 км. При использовании специального оптического передатчика для линий длиной до 20 км используется уменьшение SBS до выходной мощности передатчика 23 дБм. Теоретически видео OLT через усилитель EDFA может доставлять сигнал максимально 64 пользователям одновременно, что больше, чем в PON TDM для передачи данных.

В случае двухуровневого деления сигнала пассивный оптический сплиттер первого уровня может быть установлен на станции сразу за EDFA, хотя может находиться и за ее пределами. Установка сплиттера сразу после усилителя предотвращает возникновение рассеяния Бриллюэна, поскольку после деления оптическая мощность сигнала находится ниже порогового значения его возникновения. Если переместить оптический сплиттер за пределы станции, тогда, соответственно, коэффициент деления уменьшится до 32.

Кабельные и FTTH операторы чаще всего отказываются от аналогового контента и переходят на полностью цифровую передачу видеосигналов, что уменьшает мощность передатчиков, снижает затраты и требования к частотному спектру, причем цифровые видеосигналы намного менее требовательны к полосе пропускания. Цифровое видео также менее чувствительно к шуму и, следовательно, имеет более высокое качество изображения, чем аналоговый видеосигнал. В случае передачи цифрового видеосигнала, модулированного посредством QAM, минимальная необходимая мощность приемника пользователя составляет -12 дБм, то есть в системе остается большой баланс мощности. Полностью цифровая телевизионная система требует меньше мощности на передатчике, в результате чего ее характеристики отдаляются от порогового значения рассеяния Бриллюэна.

Также при планировании системы передачи видео необходимо рассмотреть помехи, которые возникают в результате совместной передачи различных данных по одному волокну. При передаче видео в диапазоне 1550 нм передача на 1490 нм вызывает дополнительный шум ввиду вынужденного рассеяния Рамана (Simulated Raman Scattering – SRS), поэтому желательно, чтобы передатчик в OLT не превышал определенных пороговых значений выходной мощности.

Кроме аналоговой и цифровой видеопередачи некоторые РЧ-каналы могут использоваться для передачи данных. В этом случае при планировании системы необходима еще большая аккуратность по причине возможных искажений и переходных помех с цифровых каналов передачи данных на аналоговые каналы. Даже в случае использования отдельного лазера для аналоговых сигналов в результате рассеяния Рамана возникают нежелательные переходные помехи.

5.3. Функционирование GPON

В пассивной оптической сети все пользователи используют общий канал связи – физическое волокно прокладывается от сплиттера до станции, где находится OLT. В настоящее время наиболее экономичным способом деления канала связи между несколькими пользователями считается разделение во времени (Time-Division Multiplexing – TDM). При этом, конечно, необходимо разделять нисходящий трафик, для которого выполняется разделение между абонентскими устройствами ONU/T во времени, и восходящий трафик, где выполняется совместный доступ к OLT с разделением во времени. При совместном доступе с разделением во времени могут возникать выбросы трафика (неравномерность длительности пакетов), требующие особой обработки.

Эффективность передачи цифрового сигнала также зависит от линейного кодирования, которое различно для GPON и EPON, причем большое преимущество GPON заключается именно в линейном кодировании. В EPON, который происходит от передачи сигналов Ethernet, используется кодирование типа 8B/10B, в GPON применяется передача скремблированного NRZ.

Перед началом коммуникации в пассивной оптической сети необходимо выполнить процедуры регистрации пользователей и определения расстояния до пользователей, что позволяет повысить эффективность используемого временного мультиплексирования. И, наконец, поскольку к пассивной оптической сети подключено большое количество пользователей, необходимо уделить особое внимание обеспечению безопасности в ней.

5.3.1. Основы функционирования GPON на физическом уровне

Разделение во времени в нисходящем направлении

В нисходящем направлении осуществляется связь между одним OLT и несколькими ONU/T. OLT осуществляет связь с каждым ONU/T при помощи разделения во времени. При этом, OLT постоянно передает непрерывный поток данных, предназначенных разным пользователям. Каждый отдельный ONU/T принимает весь поток данных и выбирает предназначенную только для него информацию. В результате вся полоса пропускания в нисходящем направлении делится между всеми пользователями, а трафик распределяется между ними.

Постоянно передаваемый сигнал OLT служит, кроме того, для синхронизации ONU/T. Нисходящий трафик состоит из кадров продолжительностью 125 мкс. OLT постоянно передает этот сигнал со скоростью 8 кГц (1/125 мкс) даже, когда данные не передаются. Таким образом, передающий лазер в OLT никогда не выключается. Ввиду различного затухания, различные ONU/T принимают кадры различных уровней мощности, но один ONU/T принимает кадры одной мощности и это обеспечивает для него простоту функционирования.

Совместный доступ с разделением во времени в восходящем направлении

В восходящем направлении все ONU/T должны осуществлять связь с одним OLT, которая производится на основе разделения во времени. Совместный доступ на основе разделения во времени (TDM) был выбран потому, что эта технология для сетей городского типа (звезда) дешевле и проще совместного доступа на основе разделения длин волн (WDMA) и совместного доступа на основе кодового разделения (CDMA). Исключение здесь может возникать для протяженных технологических сетей.

Таким образом, от ONU/T в направлении OLT передается непостоянная последовательность пакетов данных (burst), причем каждый пакет принадлежит отдельному пользователю. Эти пакеты могут быть разными по продолжительности и формируются они в виде кадров, которые, как и в нисходящем направлении имеют длительность 125 мкс. Поскольку все ONU/T имеют различную удаленность от OLT, а каждый путь имеет различное затухание, поступающие в OLT пакеты данных могут иметь различную мощность, что естественно усложняет работу приемника на стороне OLT.

Поступающие пакеты (burst) должны быть разделены во времени так, чтобы они не перекрывались между собой. Поэтому передатчик ONU/T должен передавать свой пакет по согласованию с OLT. После передачи пакета данных ONU/T сразу же прекращает передачу, дав тем самым возможность другому ONU/T начать передачу. Время начала передачи и ее продолжительность определяются протоколом, который должен обеспечить точное согласование.

В общем случае телекоммуникационный протокол представляет собой процедуру, использующуюся для передачи сигнала или сообщения, он обеспечивает формальное описание цифровых форматов сообщений и правил для обмена сообщениями в телекоммуникационных системах. В PON используется инкапсуляция полезных данных, причем к этим данным добавляется заголовок, содержащий все необходимые для данного протокола элементы.

Предотвращение коллизий обеспечивается посредством защитного интервала времени Δt . Для компенсации разного расстояния до различных ONU/T в процессе определения расстояния вычисляется защитный интервал времени, необходимый для предотвращения коллизий кадров в восходящем направлении. От размера этого интервала зависит дальность действия пассивной оптической сети.

В нисходящем направлении распределение полосы пропускания может выполняться равномерно или с помощью динамического распределения (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA). Средняя разрешенная задержка при передаче в PON составляет 1,5 мс.

Обеспечение безопасности в PON

Требования к обеспечению безопасности в PON основаны на том, что в сети имеется множество ONU/T, соединенных между собой посредством одного OLT. Все они используют общий протокол и должны четко следовать его правилам. Любое отступление от заранее определенных правил коммуникации может привести к отказу сети или подставить под угрозу

безопасность передаваемой информации. Поскольку в реальной эксплуатации нельзя ожидать, что все пользователи будут следовать правилам, необходимо реализовать в сети механизмы для обеспечения безопасности передаваемой информации, т.е. оператор сети должен обеспечить конфиденциальность пользователей.

В восходящем направлении сеть PON относительно защищена. Во-первых, приемник ONU/T предназначен для приема сигналов только с длиной волны 1490 нм, а, во-вторых, восходящий трафик из-за направленности сплиттера виден только OLT. От оптического сплиттера сигнал обратно в направлении ONU/T не отражается.

Поскольку в нисходящем направлении используется распределенная передача посредством пассивного сплиттера мощности, то каждый ONU/T получает весь нисходящий трафик. В результате может осуществляться прослушивание всего передаваемого в нисходящем направлении трафика OLT. Более того, к свободным выходам оптического сплиттера может подключиться злоумышленник и прослушать весь нисходящий трафик. Таким образом, нисходящий трафик больше подвержен возможности прослушивания и несоответствующего использования, чем восходящий трафик. Нисходящий трафик, предназначенный конкретному ONU/T, имеет свой идентификационный номер (ID), что позволяет данному ONU/T идентифицировать свой трафик и отклонять весь прочий. Тем не менее, механизм идентификации не обеспечивает требуемой безопасности, поскольку злонамеренный пользователь может начать принимать весь трафик. Также злонамеренный пользователь может представиться ложным идентификатором, в результате чего он получит доступ к услугам, на пользование которыми у него нет прав. Наиболее слабой точкой системы, в которой может произойти кража идентификатора, является процесс регистрации пользователей, когда OLT передает соответствующий идентификатор на все ONU/T. По этим причинам в сети PON необходимо обеспечить дополнительную безопасность. С целью решения этой проблемы в нисходящем направлении в процессе развития PON было предложено несколько механизмов.

Для повышения безопасности стандарт EPON определил процедуру шифрования нисходящего трафика 16-битным ключом или с помощью операции XOR между данными и ключом. Используемый ключ создается между ONU/T и OLT. Система ненадежна, поскольку ключ можно взломать за 512 попыток.

В GPON безопасность нисходящего трафика обеспечивается с помощью техники AES (Advanced Encryption Standard), предусматривающей использование 128-битного ключа, который практически невозможно взломать, поскольку количество всех комбинаций составляет $3,4 \cdot 10^{38}$. Шифрование – это техника, при которой данные преобразуются в нечитаемый формат с целью их защиты от несанкционированного использования. При этом очень важным является процесс создания ключа, в который не может включиться ни один пользователь. Первая мера предосторожности реализована при регистрации,

когда OLT назначает каждому ONU/T идентификационный номер (ID). Перед тем, как OLT назначит ID, ONU/T должен быть идентифицирован с помощью пароля, известного только OLT. По завершении регистрации OLT связывается с конкретным ONU/T, чтобы сообщить ему ключ. Таким образом, ключ создается в ONU/T по запросу OLT. Поскольку восходящий путь защищен, этот ключ получает только OLT. После того, как OLT получит ключ, он сообщит ONU/T о начале использования ключа. Начиная с этого момента, OLT кодирует часть нисходящего трафика, предназначенного только данному ONU/T, с помощью согласованного ключа. Для дальнейшего обеспечения безопасности ключ шифрования периодически обновляется, например, раз в час, не оказывая при этом воздействия на качество передачи данных.

Линейное кодирование

Поскольку EPON относится к технологии Ethernet, то используется линейное блочное кодирование 8B/10B. Это приводит к уменьшению скорости передачи с 1,25 Гбит/с до 1 Гбит/с. В GPON передача осуществляется в формате NRZ со скремблированием. Для скремблирования часто применяется полином x^7+x^6+1 . Таким образом удастся избежать дополнительной сигнальной нагрузки.

Сигнальные выбросы (burst) в восходящем направлении

В восходящем направлении трафик передается не связанно. В OLT кадры с данными поступают импульсно (выбросами – burst). Передача таких выбросов не синхронизирована, т.е. фаза принятых в OLT оптических пакетов произвольна. К тому же кадры передаются от ONU/T, находящихся на различном удалении от станции. Следовательно, мощность приходящих пакетов различна.

Предположим, что имеются два последовательных выброса (рис 39). Первый, более мощный выброс принадлежит самому близкому ONU/T, а второй более слабый – самому удаленному ONU/T. Каждый выброс начинается с синхронизирующего заголовка и ограничителя. Отдельные выбросы необходимо разделять защитным интервалом времени. Этот защитный интервал вместе с заголовком для синхронизации и ограничителем создают сигнальную нагрузку в соединении PON.

Мощный выброс ближнего ONU/T

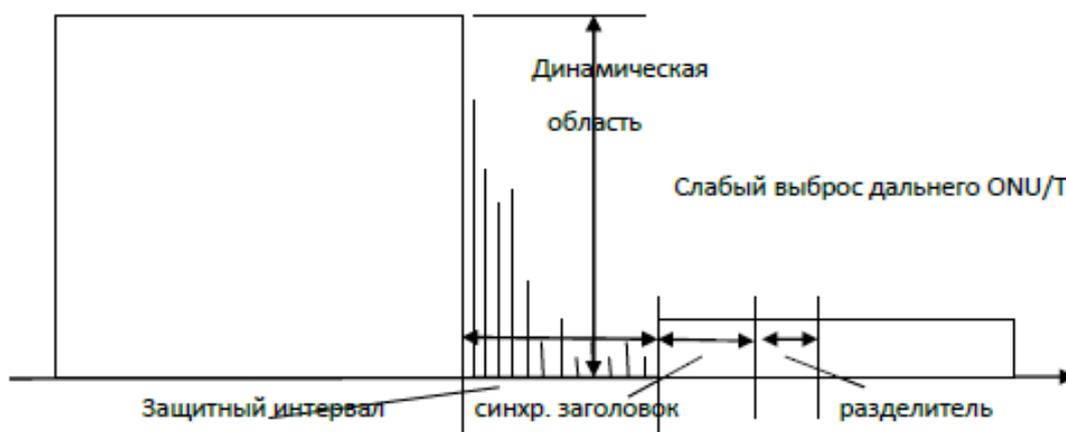


Рис 39. Оптические сигнальные выбросы разной мощности

Каждый раз, когда ONU/T передает выброс данных в сторону OLT, он должен также передать синхронизирующий заголовок, обеспечивающий в приемнике настройку требуемого уровня и синхронизации. Как и в любом приемнике данных в OLT для выбросов данных в восходящем направлении необходимо выполнить регенерацию такта и данных (Clock and Data Recovery – CDR). Для правильного приема необходимо также локальное выравнивание фазы.

Между восходящим и нисходящим трафиком имеется большая разница в полосе пропускания. В направлении пользователя полоса пропускания узкая, а постоянные времени продолжительные. В произвольной последовательности различных выбросов в направлении станции полоса пропускания должна быть широкой, чтобы фиксация по синхронизирующему заголовку выполнялась быстро и также быстро должна выполняться регенерация.

Поскольку на вход фотоприемника поступают пакеты разной мощности, в нем возникает ряд проблем. При высокой мощности оптического сигнала может произойти перегрузка фотоприемника с искажениями сигнала. Прием различных мощностей становится причиной помех из-за переходных процессов. Ввиду наличия помех между отдельными пакетами требуется защитный интервал для компенсации переходных процессов.

С целью упрощения требований к приемнику в OLT реализуется специальный механизм динамического контроля мощности. При помощи данного механизма OLT выравнивает сигналы различной мощности различных ONU/T путем передачи им запросов на увеличение или уменьшение исходной мощности. Это значит, что ONU/T, расположенный ближе к OLT и имеющий меньшие потери мощности на оптической трассе, будет передавать данные с меньшей мощностью, чем ONU/T, расположенный дальше и имеющий большие потери. В GPON с этой целью используется сообщение PLSu (Power Levelling Sequence upstream) длиной 120 байт. Данное сообщение используется для настройки мощности лазера ONU/T, причем настройка возможна на трех уровнях (0дБм, 3дБм и 6дБм).

Регистрация пользователей

Перед началом передачи информации необходимо зарегистрировать всех пользователей PON. Процедура регистрации определена в TR-156. При регистрации серийного номера каждому ONU/T назначается адресная метка ONU-ID, используемая для управления, контроля и тестирования сети. Регистрация пользователей выполняется при первом включении OLT в сеть, а также при каждом подключении нового пользователя (ONU/T).

Полная процедура регистрации нового пользователя приведена на рис 40. Начинается эта процедура с того, что OLT останавливает исходящий трафик для всех ONU/T, которые уже включены в сеть и осуществляют связь с OLT. Во время регистрации нового пользователя все зарегистрированные пользователи не должны передавать никаких данных. На следующем этапе OLT запрашивает

у всех ONU/T без ONU-ID их серийные номера. Каждый ONU/T имеет серийный номер размером 8 байт, содержащий код производителя (4 байта). Незарегистрированный ONU/T сообщает свой серийный номер по истечении произвольного интервала времени (задержка).

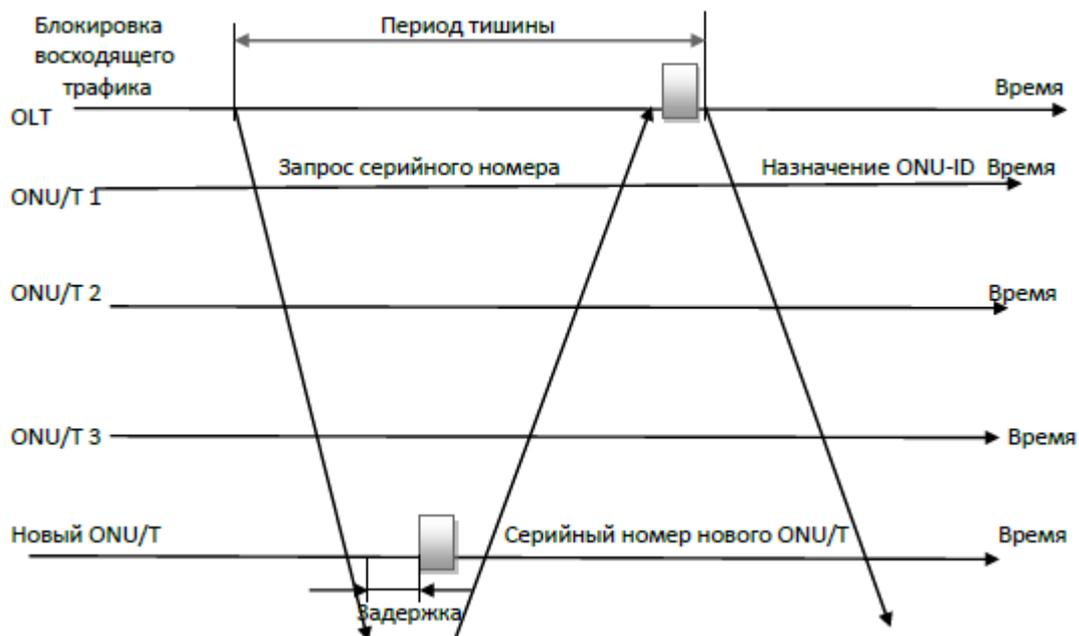


Рис 40. Назначение ONU-ID новому пользователю

При наличии в сети нескольких незарегистрированных ONU/T в случае их одновременного ответа может возникнуть конфликтная ситуация. Избежать таких ситуаций можно с помощью повторного ответа с произвольной задержкой. С добавлением произвольного времени ответа вероятность повторной конфликтной ситуации экспоненциально падает. На последнем этапе OLT присваивает ONU-ID (1 байт) новому ONU/T. После получения новым ONU/T своего ONU-ID, регистрация успешно завершается, а ONU/T включается в сеть. Идентификатор ONU-ID является постоянным и уникальным для всей сети PON до его деактивации, то есть отключения ONU/T.

Определение расстояний до пользователей

В общем случае пользователи находятся на различном удалении от OLT. ONU/T осуществляют доступ к OLT на основе временного разделения, требующего очень точной настройки. Временное согласование выполняется на уровне OLT на базе контроля доступа к среде передачи данных (Media Access Control – MAC). Начало передачи восходящего трафика и продолжительность пакетов определяются OLT посредством протокола динамического распределения спектра (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA)

Для того, чтобы определенный ONU/T выполнял передачу данных в точно определенное время и во избежание конфликтных ситуаций с остальными ONU/T, необходимо знать задержку между передачей ONU/T и приемом OLT. Чем более точно определено время задержки отдельных ответвлений, тем меньше требующийся защитный интервал времени между выбросами данных.

Уменьшение защитного интервала времени увеличивает эффективность соединения. По этим причинам в сети PON необходимо определить расстояние до пользователей (ranging).

Определение расстояния до пользователей выполняется в начале эксплуатации сети и при подключении новых ONU/Т. Также эта процедура выполняется во время функционирования для обновления параметров и выполнения соответствующих корректировок. С этой целью OLT периодически передает запросы на измерение расстояния. Ввиду старения компонентов и изменения температурных условий передачи данных задержки постоянно меняются. С изменением температуры меняется коэффициент преломления волокна и его физическая длина, в результате чего происходит изменение задержки порядка 36 пс/км/градС.

Система определения расстояния от OLT до ONU/Т основана на измерении времени. При этом время измеряется только с использованием часов OLT. Не имеет значения, показывают ли часы OLT правильное время. Главное, чтобы они были точными. Если бы часы OLT были синхронизированы с атомными цезиевыми часами, обеспечивалась бы стабильность 10^{-12} . Для сети доступа такая стабильность слишком велика, поскольку для обеспечения стабильности в сети достаточно часов с фазовой ошибкой порядка нескольких нс. Эта стабильность достигается по протоколу синхронизации IEEE 1588.

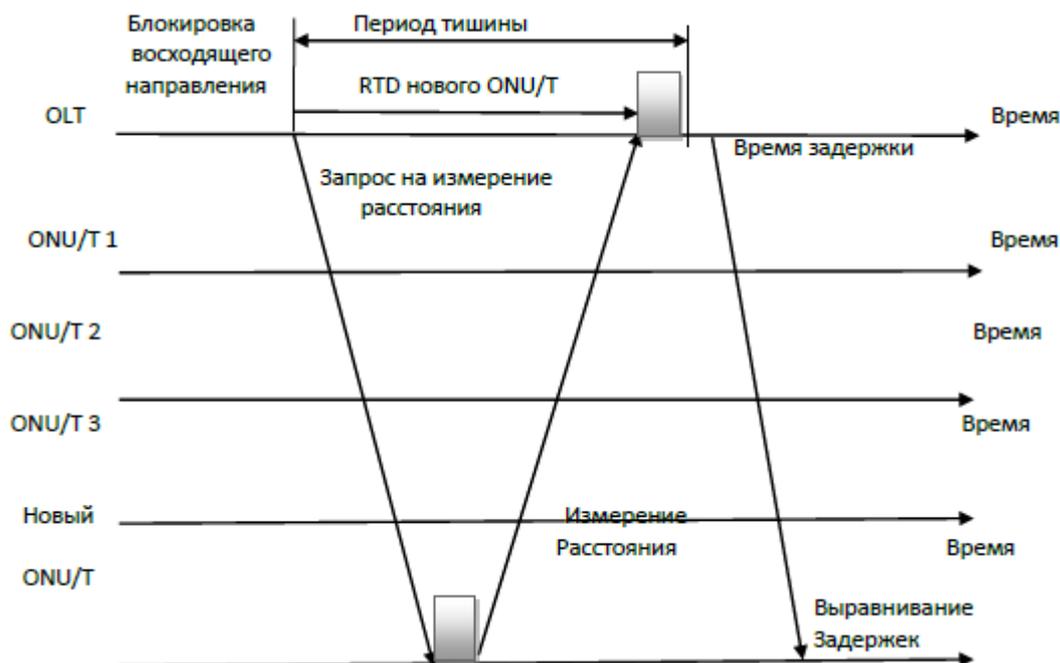


Рис 41. Измерение RTD и выравнивание задержек

Процедура определения расстояний, показанная на рис. 41, начинается тогда, когда OLT сообщает всем в настоящий момент зарегистрированным ONU/Т о прекращении передачи. После этого OLT запрашивает в определенном ONU/Т сигнал для измерения расстояния. Импульсы, передаваемые OLT, можно называть вопросительными импульсами или

вопросами. Вопрос должен содержать ONU-ID, поскольку в противном случае ONU/T создавали бы помехи друг для друга. ONU/T с запрошенным серийным номером по истечении определенного интервала времени передает сигнал для измерения задержки, содержащий его ONU-ID. Импульсы вызываемого ONU/T можно называть ответами. С помощью вопроса и ответа можно измерить двустороннюю задержку (Round-Trip Delay – RTD). После измерения OLT времени задержки его значение с помощью сообщения PLOAM (Physical Layer Operations And Maintenance) записываются в регистр ONU/T. В результате выравнивается задержка отдельного ONU/T по отношению к остальным.

При измерении расстояний каждый ONU/T получает свое значение для выравнивания задержек (Equalization Delay). Данная задержка определяет задержку ответа ONU/T на запрос OLT при доставке определенного количества данных. Благодаря этому предотвращается конфликт кадров. Виртуально это выглядит так, будто все ONU/T равно удалены от OLT и кадры могут быть распределены по времени для обеспечения эффективной передачи без конфликтов.

После передачи запроса на измерение RTD OLT должен зарезервировать определенный интервал времени, в течение которого будет ожидаться ответ со стороны ONU/T. Размер этого временного интервала будет зависеть от физического расстояния.

При дальности действия PON до 20 км интервал времени ожидания ответа составляет более 200 мкс. Стандарт также предусматривает дополнительный резервный интервал длительностью 50 мкс. Дополнительный временной резерв необходим по трем причинам. Дело в том, что запрос OLT длится определенное время и ONU/T может обработать его, только получив его полностью. Далее следует время обработки ONU/T. После этого ONU/T подготовит ответ и снова потребуется определенный интервал времени для полной передачи ответа.

Таким образом, RTD - это сумма пяти значений (время передачи от OLT до ONU/T) + (продолжительность вопроса) + (время обработки в ONU/T) + (продолжительность ответа) + (время передачи от ONU/T до OLT). Т. е. полный размер интервала времени, в течение которого OLT ожидает ответа, составляет 250 мкс.

После измерения всех длин и получения информации обо всех задержках ONU/T настраивается на общие логические эталонные часы. Задача процедуры определения расстояний до пользователей заключается в определении выравнивающей задержки (Equalization Delay), с помощью которой можно виртуально обеспечить одинаковую задержку для всех ONU/T независимо от их удаленности от станции и прочих задержек, связанных с обработкой.

$$RTD_{\text{выравн}} = RTD_{\text{измер}} - 200\text{мкс}$$

В результате различные физические расстояния становятся логически одинаковыми. По завершении этой процедуры конфликты различных выбросов возникать не должны. На рис 42 показан случай, когда ONU/T 2 удален от OLT более чем на ONU/T 1. Несмотря на то, что передача на втором ONU/T

начинается до завершения передачи на первом ONU/T, конфликта не происходит.

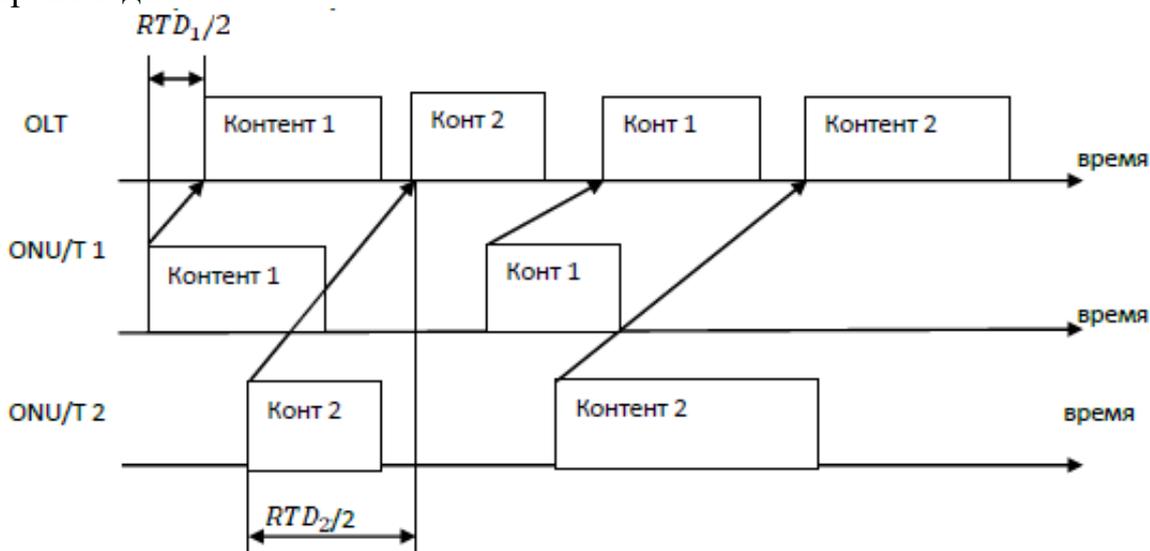


Рис 42. Отсутствие конфликта

Чем более точно определена задержка, тем меньше может быть защитный интервал между выбросами. В результате уменьшается задержка в сети и увеличивается ее пропускная способность.

5.3.2. Основы функционирования GPON на верхних уровнях

Правильное функционирование GPON обеспечивается вторым уровнем сети, называемым конвергентным уровнем передачи GPON (GPON Transmission Convergence Layer – GTC) ITU-T G.984.3. Основной задачей GTC является обеспечение транспорта между OLT и ONU/T независимо от типа интерфейса сервисного узла (Service Node Interface – SIN) в OLT и типа интерфейса сети пользователя (User Network Interface – UNI) в ONU/T.

Нисходящий трафик в GPON генерируется на стороне OLT, установленного на станции. OLT принимает данные из опорной сети и инкапсулирует их в кадры PON с помощью базового метода (GPON Encapsulation Method – GEM). OLT должен снабдить отдельные кадры адресными метками ONU-ID. После выполнения скремблирования, кодирования и шифрования кадры OLT передаются всем ONU/T. ONU/T принимают все пакеты, но могут использовать только те, которые предназначены для них, что определено в заголовке пакета. Затем они обрабатывают эти пакеты (дескремблирование и дешифрование) и передают их адресатам (пользователям). Пакеты, которые не адресованы данному ONU/T, являются для него нечитаемыми и отбрасываются.

Полный стек протоколов GTC представлен на рис 43. Хотя в стандарте G.984 физическая дальность действия ограничена 20 км, а коэффициент деления до 1:64, уровень GTC определяет максимальную логическую дальность действия 60 км и коэффициент деления до 128, с учетом дальнейшего развития технологии. Интерфейсы ONU и OLT поддерживают режимы передачи ATM и GEM, а также их комбинацию. Чаще всего используется режим GEM.

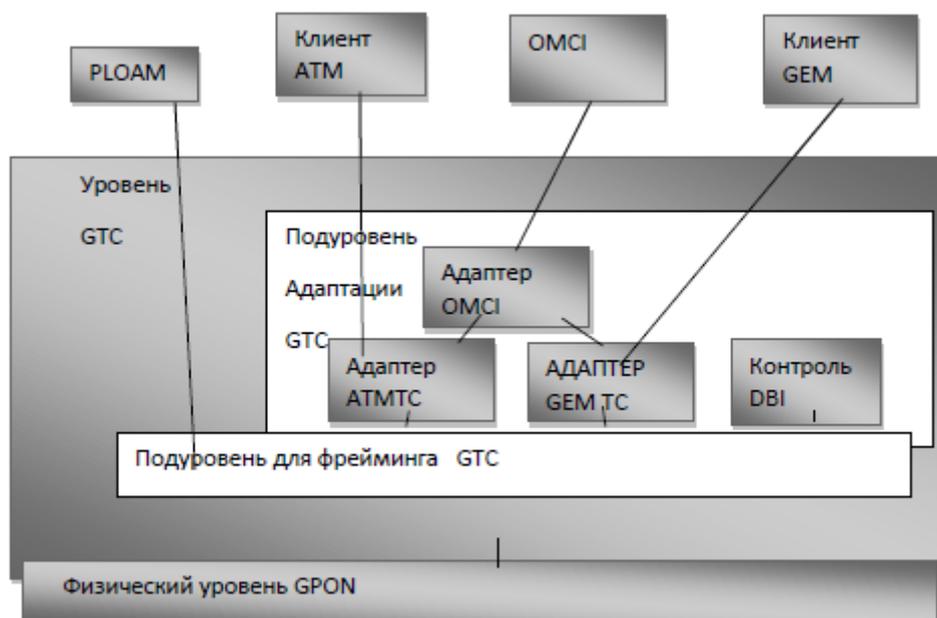


Рис. 43. Стек протоколов GTC

GTC выполняет транспортное мультиплексирование между OLT и ONU/T. Также он выполняет функции кодирования и адаптации пакетов, при реализации которых происходит добавление заголовка и полезной нагрузки. Уровень GTC также включает в себя сообщения OAM (Operation, Administration and Maintenance – OAM) физического уровня (Physical Layer OAM – PLOAM) и канал связи для интерфейса управления и контроля ONT (ONT Management and Control Interface – OMCI) (G.984.4, G.988). Также он может включать в себя необязательную по стандарту процедуру исправления ошибок (Forward Error Correction – FEC) и шифрования данных в нисходящем направлении, что увеличивает надежность и безопасность системы.

GTC использует транспортные контейнеры (Transmission CONTainer – T-CONT), которым OLT назначает Alloc-ID. Каждый Alloc-ID представляет собой 12-битный номер со значениями в диапазоне от 0 до 4095. Alloc-ID назначается ONU/T со стороны OLT с целью идентификации (виртуальной) транспортной единицы, с помощью которой выполняется динамическое распределение спектра (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA) в восходящем направлении. Эта транспортная единица называется T-CONT. Транспортные единицы T-CONT представляют собой логические каналы связи между OLT и ONU/T.

Единица T-CONT представляет собой группу логических портов и используется для динамического распределения спектра в пассивной оптической сети. Каждая единица T-CONT соответствует трафику определенного класса передачи (Transmission Class TC), то есть соответствующему классу обслуживания (Quality of Service – QoS). Один блок ONU может быть связан с одним или несколькими каналами передачи данных. Стандарт ITU-T G.983.4 описывает пять различных типов каналов T-CONT с различным качеством обслуживания. Один ONU-T, идентифицированный с

помощью ONU-ID, может иметь до пяти различных T-CONT, каждый из которых идентифицируется своим Alloc-ID. ONU-ID – это 8-битный идентификатор, который OLT назначает ONU/T во время регистрации (после получения сигнала PLOAM).

Стандарт GPON определяет два различных режима работы. Канал передачи данных может работать в режиме ATM или GEM. T-CONT в режиме ATM мультиплексирует виртуальный канал, определяемый посредством VPI и VC, а T-CONT в режиме GEM определяет соединения с помощью портов (port-ID). GEM – это виртуальный порт для инкапсуляции GEM при передаче кадров между OLT и ONU/T. Различные порты GEM имеют различные классы передачи. Каждая единица T-CONT состоит из одного или нескольких портов GEM. Каждый порт GEM использует один режим передачи T-CONT. Каждый порт GEM имеет уникальный идентификатор Alloc-ID. Порт GEM используется только для конкретного ONU/T в сети PON.

В нисходящем направлении ONU/T осуществляют доступ к единственному OLT на основе совместного доступа с разделением во времени. Поскольку ONU/T должен ждать своего времени для передачи, он должен иметь кэш. В отдельном ONU/T абонентские данные хранятся в так называемых транспортных контейнерах ((Transmission CONTainer – T-CONT). ONU/T передает данные только после получения на это разрешения от OLT. Данные, сохраняемые пользователем в ONU/T, по команде OLT передаются по сети распределения в OLT. OLT предварительно выполняет измерение расстояния до ONU/T для согласования их передачи и предотвращения возникновения конфликтных ситуаций. ONU имеет минимум четыре контейнера T-CONT для распределения данных по четырем категориям (приоритетам). Выбор ONU/T и T-CONT осуществляет OLT. OLT согласно механизму DBA предписывает ONU/T начало передачи и ширину полосы (продолжительность передачи) в зависимости от длины очереди ожидания или по какому-либо другому критерию приоритизации. Данная процедура предназначена для обеспечения приоритизации пользователей и уменьшения неравномерности трафика. OLT распознает принимаемые от ONU/T данные по ONU-ID. OLT распределяет пакеты данных ONU/T и передает их дальше по сети.

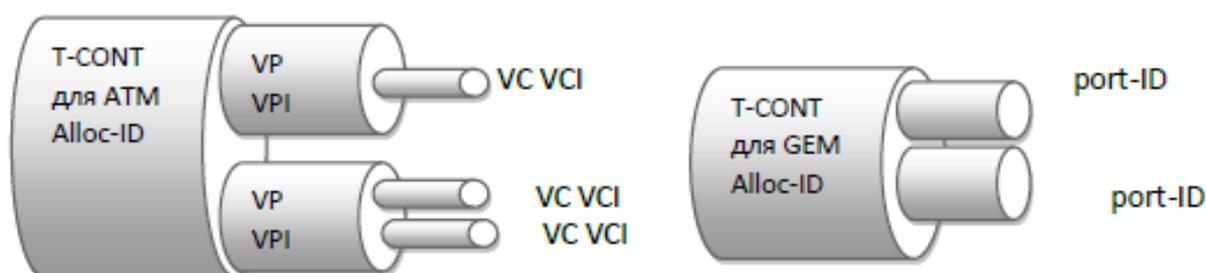


Рис 44. Сравнение каналов передачи данных ATM и GEM

T-CONT представляют собой хранилища абонентских данных с различным качеством обслуживания. Абонентские данные распределяются на входе T-CONT в зависимости от типа данных (IP, видео, аудио) и условий обслуживания абонента. Имеются четыре приоритетных класса. На выходе

трафик из T-CONT распределяется согласно механизму DBA с учетом приоритета и в зависимости от его плотности (занятость T-CONT), чтобы избежать перегрузок и, следовательно, увеличения задержек в системе.

Модель управления трафиком в нисходящем направлении намного проще, чем в восходящем. В нисходящем направлении T-CONT не используется. Трафик, поступающий через сетевой интерфейс, распределяется в OLT по различным классам передачи. После этого OLT передает трафик через порты GEM в нисходящем направлении до пользовательского интерфейса PON с использованием планировщика (scheduler). В ONU/T трафик снова делится по классам и распределяется в очереди. Планировщик используется для передачи данных до интерфейса пользователя.

Согласно TR-156 GPON предусматривает пять типов T-CONT (рис 45). В принципе это четыре класса, а пятый представляет собой комбинацию первых четырех. Первая очередь предназначена для трафика с самым высоким приоритетом с фиксированной полосой, как правило, гарантируемой оператором связи. Вторая очередь также имеет гарантированную полосу пропускания, которая может добавляться к фиксированной полосе в качестве гарантированной полосы. Данная гарантия, как правило, обеспечивается на основании дополнительного договора между абонентом и оператором. Гарантированная полоса пропускания должна оставаться доступной независимо от условий передачи данных. Фиксированная и обеспеченная полосы пропускания называются гарантированными, а дополнительные полосы – негарантированными. Они предназначены для передачи трафика с низким приоритетом. Третья очередь представляет собой необеспеченную полосу пропускания. Данная полоса не гарантируется оператором, т. е. она назначается пользователю только в случае ее доступности. В качестве четвертой возможности используется передача с наилучшими возможностями (Best Effort). При этом сеть не представляет никаких гарантий относительно осуществления передачи данных и обеспечения для пользователя какого-либо приоритета или качества обслуживания. При использовании последнего режима пользователю предоставляется неопределенная нефиксированная скорость передачи и неопределенное время доставки информации, зависящее от текущей загрузки сети.

Высокий приоритет	Очередь 1 Фиксированная полоса	Гарантир. полоса
	Очередь 2 Обеспеченная полоса	
низкий Приоритет	Очередь 3 Необеспеченная полоса	дополнительн. полоса
	Очередь 4 Наилучшее возможное	

Рис. 45. Качество обслуживания в GPON

Инкапсуляция данных в GPON

Сеть GPON, соединяющая опорную и домашнюю сети, может обеспечивать передачу телекоммуникационного трафика различного типа. Бесперебойная передача такого разнородного трафика обеспечивается с помощью базового метода инкапсуляции GPON (GPON Encapsulation Method-GEM), основанного на использовании синхронизированных периодических кадров. Метод ПУБ не зависит от интерфейса сервисного узла (Service Node Interface – SIN) в OLT и типа интерфейса сети пользователя (User Network Interface –UNI) в ONU/T.

Метод GEM реализуется на базе процедуры базовой инкапсуляции (Generic Framing Procedure – GFP) согласно ITU-T G.7041. Как видно из его названия, данный метод является базовым, т.е. используется для различных типов трафика. GFP - это техника мультиплексирования, обеспечивающая распределение данных высшего уровня различной длины. При передаче данных через GPON максимально разрешенная задержка составляет 1,5 мс, что обеспечивает поддержку всех возможных услуг. Как в восходящем направлении, так и в нисходящем направлении используется похожая структура кадров GPON. Их длина независимо от направления передачи составляет 125 мкс, т.е. в течение одинакового интервала времени OLT передает в два раза больше байт, чем ONU/T.

В нисходящем направлении OLT передает непрерывные кадры длиной 125 мкс (Рис 44). Каждый нисходящий кадр имеет заголовок, именуемый нисходящим физическим контрольным блоком (Physical Control Block downstream – PCBd), который содержит необходимую для передачи сигнализацию. За заголовком следует полезная нагрузка (payload) т.е. данные для фактической передачи. Полезная нагрузка состоит из произвольного числа аутентичных ячеек ATM и фрагментов GEM. Кадр ATM имеет длину 53 байта, причем заголовок составляет 5 байт, а полезная нагрузка – 48 байт. Фрагмент является частью пользовательской информации неопределенной длины. Отдельные Фрагменты могут быть различной длины, однако не должны превышать общей доступной длины.

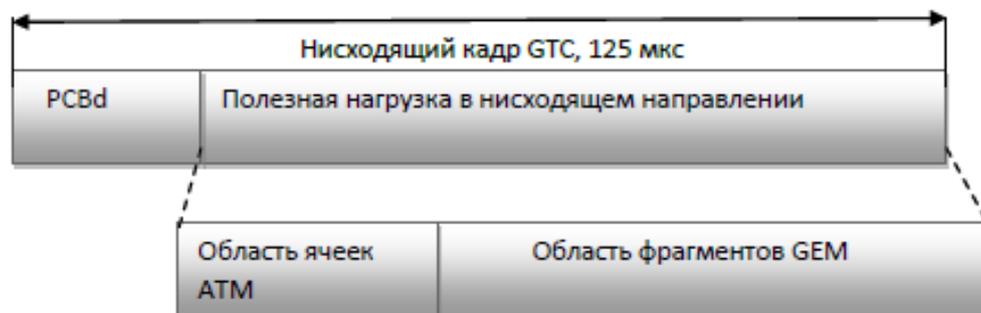


Рис 44. Непрерывный кадр в нисходящем направлении

В восходящем направлении кадры имеют неравномерную структуру (рис 9). Каждый кадр состоит из нескольких выбросов, причем каждый выброс

принадлежит своему ONU/T. Между выбросами предусмотрен защитный интервал, а в их начале содержится заголовок, называемый восходящими процедурами физического уровня (Physical Level Operations upstream – PLOu).

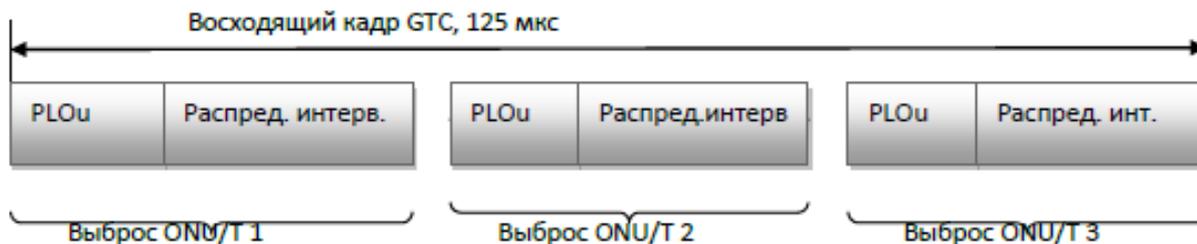


Рис 45. Прерванный кадр GTC в восходящем направлении

Физический контрольный блок в нисходящем направлении

Нисходящий физический контрольный блок (Physical Control Block downstream – PCBd) состоит из части с фиксированной длиной и части с переменной длиной (рис 44). Область фиксированной длины содержит поле длиной 4 байта для синхронизации (Physical Sync), поле Ident длиной 4 байта и поле PLOAM. Все эти поля защищены одним байтом для контроля четности (BIP). Процедура определения 8-битного BIP определена в Рек. ITU-T G.707.

Для синхронизирующей последовательности скремблирование не применяется. Она обозначает начало нисходящего кадра и используется ONU/T для синхронизации нисходящей последовательности бит. Данное 4-байтовое поле может состоять из предварительно определенной или статической последовательности. ITU-T определяет статическую последовательность 16-ричным числом В6АВ31Е0. Данное число представляет собой последовательность Баркера длиной 32 бита с максимальным числом переходов и минимальным уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции.

PSync	Ident	PLOAMd	BIP	Plend	Plend	План восх.
4B	4B	13B	1B	4B	4B	№*8B

Рис 46. Заголовок PCBd в восходящем направлении

В поле Ident сначала идут два 1-битных поля и одно 30-битное поле (рис 11). Первое поле означает использование процедуры прямого исправления ошибок (Forward Error Correction – FEC), что определяется старшим значащим битом (Most Significant Bit – MSB). Второй одинарный бит зарезервирован для будущего использования. Остальные 30 бит предназначены для счетчика кадров, значение которого увеличивается при каждом переданном в нисходящем направлении кадре. При помощи данного счетчика можно контролировать последовательность кадров.

FEC Ind	Резерв	Счетчик кадров
1 бит	1 бит	30 бит

Рис 47. Строение 4-байтного поля Ident

13-байтовый PLOAMd используется для сообщения OAM (Operation, Administration and Maintenance – OAM) физического уровня для ONU/T. Данное сообщение состоит из четырех полей (рис 47). Функции PLOAM выполняют регистрацию ONU/T, определение расстояний до пользователей, выравнивание уровня мощности, обновление ключа криптозащиты, уведомление об ошибках на физическом уровне и т.д. Поле ONU-ID используется для идентификации ONU/T, которому предназначено данное сообщение. Поле Msg ID используется для обозначения типа сообщения в зависимости от стандартизированных возможностей, указанных в Рек. ITU-T G.984.3. Далее следует 10-байтовое сообщение, предназначенное для данного ONU/T. Последний байт предназначен для процедуры защиты поля PLOAMd от возможных ошибок при передаче данных на физическом уровне посредством циклической избыточной проверки (Cyclic Redundancy Check – CRC).



Рис 47. Строение 13-байтового поля PLOAMd

В части PCBd с переменной длиной сначала идут два поля с 4-байтовой информацией о длине нисходящей полезной нагрузки (Payload Length downstream – Plend). Структура Plend приведена на рис 48. Несмотря на то, что в конце имеется поле для избыточной проверки CRC, из-за важности Plend передача выполняется дважды. Передача с резервированием увеличивает вероятность правильного восприятия информации ONU/T.

Первая часть Plend называется Blen (BWMap Length) и предоставляет информацию о длине плана восходящей полосы пропускания (Up Stream BandWidth map – US BW). Поскольку поле имеет длину 12 бит, то в кадре может быть до 4095 ($2^{12}-1$) местоположений. Вторая часть Plend называется Alen (ATM Partition Length) и также состоит из 12 бит. Оно предоставляет информацию о расположении или длине секции с ячейками ATM в и плане восходящей полосы пропускания (до 4095).



Рис 48. Строение 4-байтового поля Plend

План восходящей полосы пропускания несет информацию, определяющую доступ ONU/T к среде передачи данных в восходящем направлении. Каждый ONU/T может иметь несколько каналов передачи T-CONT. Каждый 8-байтовый сегмент доступа в плане полосы пропускания имеет идентификатор местоположения канала передачи, время начала и окончания передачи данного канала в исходящем направлении и 12-битные флаги, определяющие распределение.

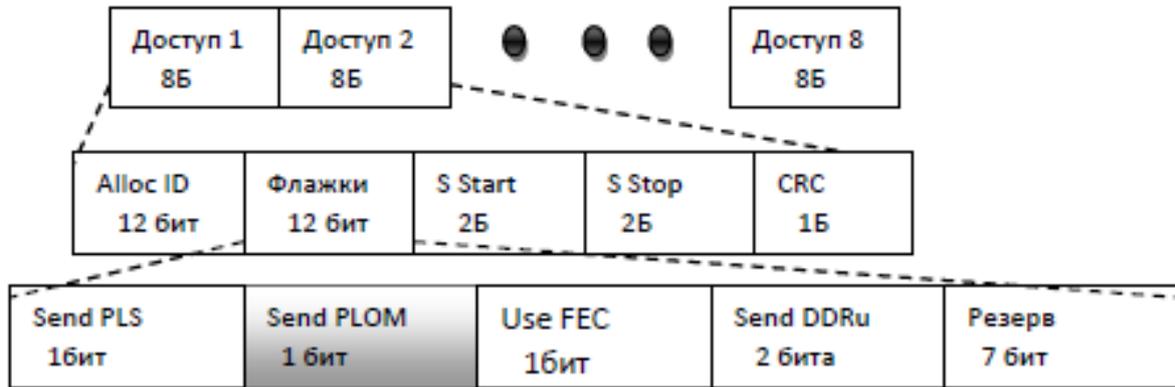


Рис 49. Структура плана восходящей полосы пропускания

Процедуры физического уровня в восходящем направлении

Передача GTC в восходящем направлении состоит из восходящих виртуальных кадров длительностью 125 мкс. Восходящий виртуальный кадр содержит выбросы различных ONU/T. Каждый выброс начинается с заголовка, называемого процедурами физического уровня в восходящем направлении (Physical Level Operations upstream – PLOu) см. Рис 49. Второе поле – это 13-байтовое поле PLOAMu, имеющее такой же формат, как и PLOAMd. Далее следует поле под названием PLSu (Power Levelling Sequence Upstream), состоящее из 120 байт, для контроля мощности лазера ONU/T. PLSu используется для настройки или изменения мощности ONU/T (0 дБ, 3 дБ, 6 дБ), чтобы OLT принимал от всех ONU/T сигналы приблизительно одинаковой мощности, а также может использоваться для проведения измерений.

За этими сигнальными данными следует полезная нагрузка отдельных CONT одного ONU/T. Каждый раз, когда очередь передачи данных доходит до следующего ONU/T, она должна начинаться с нового выброса и первоочередной отправки PLOu и прочих сигнальных данных в восходящем направлении.



Рис. 50. Структура отдельного выброса в восходящем направлении

Поле DBRu (Dynamic Bandwidth Report upstream) связано с конкретным каналом передачи T-CONT. Оно состоит из поля (Dynamic Bandwidth

Assignment), которое может иметь длину 1, 2 или 4 байта для сообщений DBA, и поля CRC длиной 1 байт. Сообщения DBA обозначают исходящие очереди для динамического распределения полосы пропускания. Для расчета DBA ONU/Т сообщает OLT о фактическом трафике с помощью поля DBRu.

Поле, называемое процедурами физического уровня в восходящем направлении (PLOu), строение которого приведено на рис 51, начинается с заголовка для синхронизации (преамбула). Благодаря данному заголовку OLT получает информацию о поступлении блока. Заголовок для синхронизации позволяет схемам синхронизации первого уровня синхронизироваться с передачей в восходящем направлении. Ограничитель (delimiter), следующий за синхронизирующим заголовком, обозначает начало исходящего выброса. Длину и форму синхронизирующего заголовка, а также ограничителя определяет OLT с помощью входящих сообщений PLOAMd. Поле индикации в PLOu обеспечивает статус сообщения ONU/Т для OLT в реальном времени.

Преамбула а Б	Ограничитель b Б	VIP 1 Б	ONU-ID 1 Б	Ind 1 Б
------------------	---------------------	------------	---------------	------------

Рис 51. Строение поля PLOu

Если один ONU/Т назначен рядом с канальным интервалом для нескольких каналов передачи с различными идентификаторами местоположения, достаточно передать PLOu только один раз. В каждом поле имеются три общих дополнительных поля:

1. Функционирование на физическом уровне, администрирование и координация в исходящем направлении (PLOAMu);
2. Выравнивание мощности в исходящем направлении (PLSu);
3. Передача динамической информации о полосе пропускания в исходящем направлении (DBRu).

Динамическое распределение спектра

Один ONT используется для подключения одного абонента или небольшого числа абонентов в случае ONU. С учетом самой природы пользовательских услуг трафик является неравномерным и статически переменным. Поэтому время доступа распределяется между абонентами неравномерно с учетом фактических условий передачи и потребностей пользователей, поскольку все пользователи имеют различные потребности. В GPON известны два основных способа назначения пользователям продолжительности передачи данных, т.е. распределения полосы пропускания между пользователями.

Самым простым является фиксированный способ распределения полосы пропускания (Static (Fixed) Bandwidth Allocation – FBA) в течение всего времени функционирования сети или до изменения договорных условий обслуживания (Service Level Agreement – SLA). SLA –это соглашение об уровне обслуживания между абонентом и оператором. Абонент оплачивает услуги и получает определенный приоритет независимо от занятости сети. В этом случае

время связи конкретного ONU/T в восходящем направлении назначается статически (оно может быть различным) независимо от текущих условий передачи и потребности в передаче трафика. Но необходимо понимать, что фиксированное распределение полосы пропускания не является оптимальным решением и увеличивает задержки в сети.

Намного более гибкой является вторая возможность, при которой для распределения полосы пропускания используется динамическая методика распределения полосы пропускания (Dynamic Bandwidth Allocation – DBA). При этом каждому ONU/T полоса пропускания в нисходящем направлении назначается динамически в зависимости от текущих условий передачи, требований к передаче данных и приоритета. DBA обеспечивает надежное функционирование и увеличивает эффективность функционирования сети за счет наиболее рационального распределения полосы пропускания. Все потребности в отношении передачи данных определяются OLT на базе протокола DBA. Основой этого способа являются:

- Контроль трафика ONU/T на стороне OLT (без передачи информации о состоянии, NSR);
- Сообщение ONU/T о его очередях ожидания (с передачей информации о состоянии, SR).

Таким образом, GPON поддерживает механизмы DBA с передачей информации о состоянии (Status Reporting – SR) и механизмы без передачи информации о состоянии (Non Status Reporting – NSR). Динамическое распределение является более оптимальным, поскольку оно повышает эффективность работы сети, уменьшает неравномерность трафика и снижает задержки.

Эффективная система DBA обеспечивает поддержку увеличенного числа пользователей (oversubscription). Цели DBA:

- Рациональное использование спектра (времени) и, следовательно, сети;
- Минимальные задержки;
- Учет приоритетов.

При использовании механизмов NSR DBA OLT контролирует объем исходящего трафика. В этом случае ONU/T не передают информацию о состоянии своего трафика, т.е. о состоянии занятости своего кэша. OLT сам учитывает текущее состояние трафика в восходящем направлении, контролирует его и на основании этих данных принимает соответствующие решения. ONU/T с пустой очередью ожидания перейдет к пустым (idle) кадрам в течение своего интервала времени. Эти пустые кадры служат OLT для NSR DBA. В этом случае между ONU/T и OLT не требуется протокол для передачи информации о состоянии очередей ожидания, поскольку OLT сокращает время передачи для ONU/T, передающих пустые кадры, и увеличивает его для ONU/T, передающих полные кадры. OLT будет увеличивать данный интервал, пока не будут обнаружены пустые кадры. Поскольку OLT оценивает состояние на основании трафика в предыдущем интервале, NSR DBA не является наиболее оптимальным методом, т.к. всегда работает с задержкой. В этом

случае невозможно достичь оптимальных результатов, поскольку OLT может неправильно оценить плотность трафика. Это ведет к увеличению задержек. Только SR DBA обеспечивает высокую эффективность в восходящем направлении и малые задержки.

При использовании SR DBA ONU/T передают OLT сообщения (report) о состоянии очередей ожидания. Для передачи информации о занятости очередей ожидания используется восходящее соединение. ONU/T сообщает число битов в очереди ожидания в КЭШе (T-CONT) с помощью сообщения DRBv в процедурах физического уровня в восходящем направлении. OLT должен учитывать сообщение ONU/T при маршрутизации трафика с DBA. Для этих целей OLT одобряет (Grant-G) полосу пропускания, т.е. продолжительность передачи.

Реализация процедуры в целом показана на рис 52. Пользователь доставляет данные в ONU/T, который сохраняет их в очередь ожидания для восходящего трафика. После получения от OLT разрешения на передачу (Grant-G), ONU передает запрос (Request-R) на одобрение определенного объема данных в очереди ожидания. OLT определяет начало передачи и назначает (Grant-G) ONU/T продолжительность передачи в соответствии с состоянием трафика и приоритетами. ONU/T передает OLT согласованный объем данных вместе с сообщением (Report-R) с последующими требованиями по передаче восходящего трафика.

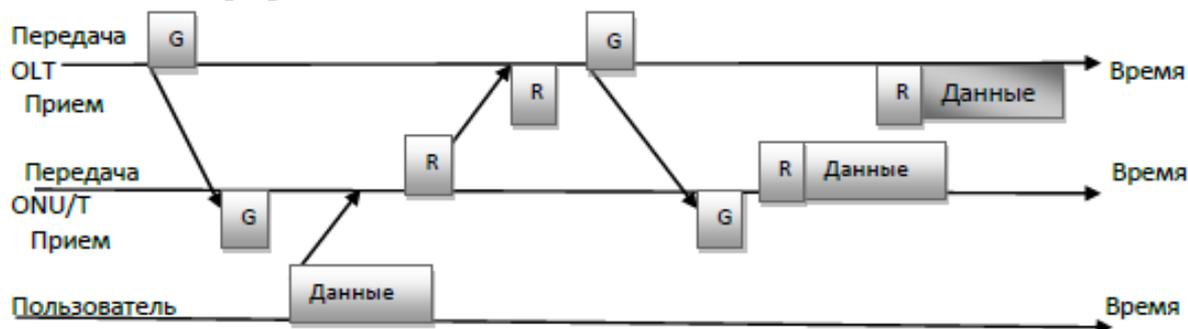


Рис 52. Обычная процедура для SR DBA

Поскольку нисходящий и восходящий трафик передаются на различных длинах волн, то процедуру SR DBA можно упростить (рис 53). В обычной процедуре OLT передает ONU/T разрешение (Grant-G) и ожидает приема его данных. В этом случае время ожидания ответа используется таким образом, что еще во время приема данных предыдущего ONU на основании расчета DBA посылается разрешение DBA следующему ONU/T. Когда он начнет передачу данных или не начнет ее при их отсутствии, OLT будет передавать уже новые разрешения. Таким образом обеспечивается наиболее рациональное использование всего имеющегося времени.

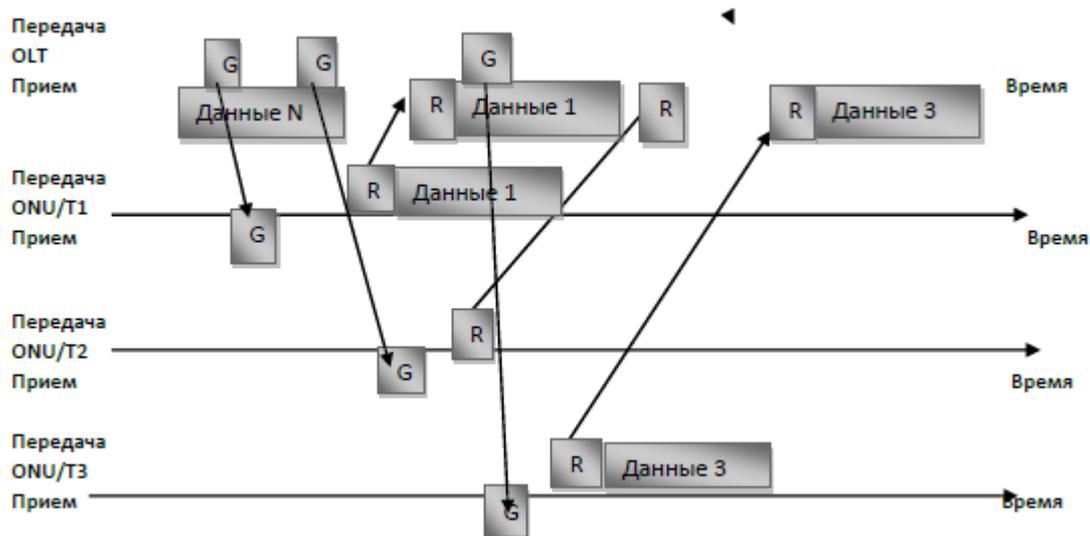


Рис 53. Ускоренная процедура для SR DBA

Имеются три способа, с помощью которых ONU/T может сообщать OLT состояние очередей ожидания.

1. При помощи битов, определяющих состояние в PLO – благодаря этому OLT может быстро и просто получить информацию о типе ожидающего исходящего трафика без остальных потребностей.
2. При помощи вспомогательного (piggyback) сообщения DBA в DBRu: для сообщения DBA предусмотрены три режима (режим 0, режим 1 и режим 2), соответствующие полю DBA длиной 1, 2 или 4 байта (т.е. DBRu длиной 2, 3 или 5 байт). Передача и формат DBRu определяются OLT с использованием 8-го и 7-го бита флагов в плане US BW. Вспомогательный DBA и DBRu обеспечивают ONU/T постоянное обновление конфигурации трафика в определенном канале передачи данных. Сообщение DBA содержит число ячеек ATM или блоков GEM (длиной 48 байт) в буфере восходящего направления (upstream buffer).
3. При помощи полезной нагрузки DBA в восходящем направлении (upstream payload): ONU/T может передать целое сообщение о состоянии трафика на один или все каналы передачи данных в рамках полезной нагрузки в восходящем направлении. Более подробно данные DBA описаны в ITU-T G.984.3.

Динамическое распределение спектра SR DBA обеспечивает наиболее эффективную передачу данных.

6. Особенности энергетического баланса в последовательной цепочке ONU/T технологической связи между двумя станциями OLT

Оптическая сеть доступа на практике встречается в двух конфигурациях. Первой архитектурной возможностью, которая появилась на начальном этапе развития, является P2P. При этом оптическая пассивная инфраструктура, т. е. оптическое волокно прокладывается от станции (Central Office- CE) до жилища пользователя. Каждому пользователю выделяется одно или одна пара оптических волокон. В доме каждого пользователя устанавливается приемопередающий модуль, называемый оптическим сетевым терминалом (Optical Network Terminal - ONT). На станции устанавливаются оптические линейные терминалы (Optical Line Terminal - OLT), причем каждому пользователю выделяется отдельный терминал. Количество приемопередающих устройств превышает количество пользователей вдвое. В ONT и OLT используются простые интерфейсы, обеспечивающие преобразование электрического интерфейса в оптический и обратно. Эта архитектура P2P стандартизована в ITU-T посредством Рекомендаций G.985 и G.986 для скоростей передачи 100 Мбит/с и 1 Гбит/с. К сожалению, для архитектуры P2P требуется большое количество волокон, занимающих много свободного места на станции и в кабельных шахтах. Основной ее недостаток – большие эксплуатационные затраты.

Второй возможностью при построении оптической сети доступа является архитектура P2MP. Из всех возможностей для организации оптической сети доступа операторам наиболее выгодна модель с пассивным кроссом, которая по сути и является пассивной оптической сетью PON, поскольку на участке между станцией и конечным пользователем не содержатся активные элементы. Пассивные сплиттеры, выполняющие функцию пассивного оптического кросса, обеспечивают низкие затраты, поскольку они могут быть установлены в любом месте, не требуют электропитания, надежны и долговечны. В случае PON часть затрат на построение сети делится между несколькими пользователями, поскольку между станцией и кроссом прокладывается только одно общее волокно длиной до 20 км. На станции используется только один приемопередатчик, предназначенный для обслуживания нескольких пользователей. Общее число устройств связи в отличие от P2P в этом случае минимально ($n+1$).

Для организации оптической сети доступа операторам наиболее выгодна модель с пассивным кроссом PON. В общем случае при построении обычной коммерческой сети связи сигнал от оконечной станции передается к пассивному сплиттеру, с помощью которого он разветвляется и доставляется к отдельным сетевым модулям ONU/T. При реализации технологической сети, которая реализуется для обслуживания технологических нужд железных дорог или различных трубопроводов, сетевые модули ONU/T располагаются последовательно, один за другим по цепочке вдоль железной дороги или трубопровода. Такая сеть связи не может иметь общего разветвителя, так как в

этом случае сплиттеры, направляющие сигнал к сетевому модулю (ONU/T), должны располагаться последовательно, один за другим и это в силу существенного затухания, вносимого каждым сплиттером, будет вносить свои, значимые особенности в энергетический баланс для оконечных станций (OLT) и оптических сетевых терминалов (ONU/T). Особенности складывающегося энергетического баланса будут различными для различных способов организации единого канала связи – TDM или WDM.

6.1. Случай GPON

Рассмотрим зависимость числа последовательно включенных между двумя станциями в одно волокно оптических сетевых терминалов (ONU/T) от расстояния между этими станциями (рис 54).

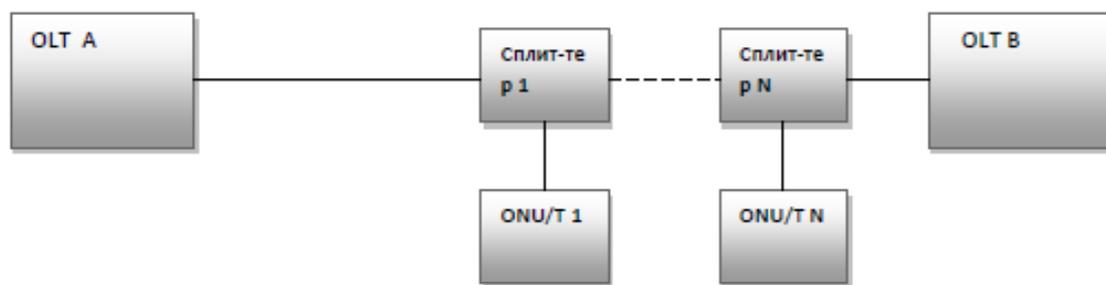


Рис. 54. Модель оборудования технологической связи

Введем следующие обозначения и определения:

В наихудших условиях по уровню приема находится последний от станции OLT A модуль ONU/T N. Расстояние между станциями L км, расстояние между модулями около 1 км. Считаем $L \gg 1$, тогда расстояние до ONU/T N = L км.

Километрическое затухание волокна – a, дБ/км, затухание сплиттера на проход – b, дБ, затухание сплиттера на выделение – c, дБ.

Энергетический бюджет оптического трансивера – Эб, дБ, эксплуатационный запас на участок между двумя станциями – Эз, дБ.

Тогда можно написать, что энергетический бюджет линии ко входу последнего модуля ONU/T N не должен быть меньше, чем

$$\text{Эб} > \text{Эз} + aL + bN + c$$

Отсюда легко определяется соотношение для максимального числа последовательно включенных модулей ONU/T

$$N < (\text{Эб} - \text{Эз} - aL - c)/b$$

Подставим сюда некоторые величины на примере проекта ж.д Архангельск - Карпагоры.

Эб = 32,5 дБ; Эз = 3 дБ; a = 0,36 дБ/км на длине волны 1310 нм; c = 11,4 дБ для сплиттера 10/90 и 6,1 дБ для сплиттера 30/70; b = 0,8 дБ для сплиттера 10/90 и 2,2 дБ для сплиттера 30/70

при различных значениях длины участка между станциями. Тогда будем иметь:
 при L = 5 км N < 20 (10/90) N < 10 (30/70)

при L = 10 км	N < 18 (10/90)	N < 9 (30/70)
при L = 15 км	N < 16 (10/90)	N < 8 (30/70)
при L = 20 км	N < 14 (10/90)	N < 7,4 (30/70)
при L = 30 км	N < 9 (10/90)	N < 5,7 (30/70)
при L = 40 км	N < 4 (10/90)	N < 4 (30/70)
при L = 45 км	N < 2,4 (10/90)	N < 3 (30/70)
при L = 50 км	N < 1 (10/90)	N < 2,4 (30/70)

Зависимости максимально возможного количества последовательно включенных в одно волокно оптических модулей ONU/T от расстояния между станциями приведены на Рис 55. N, шт

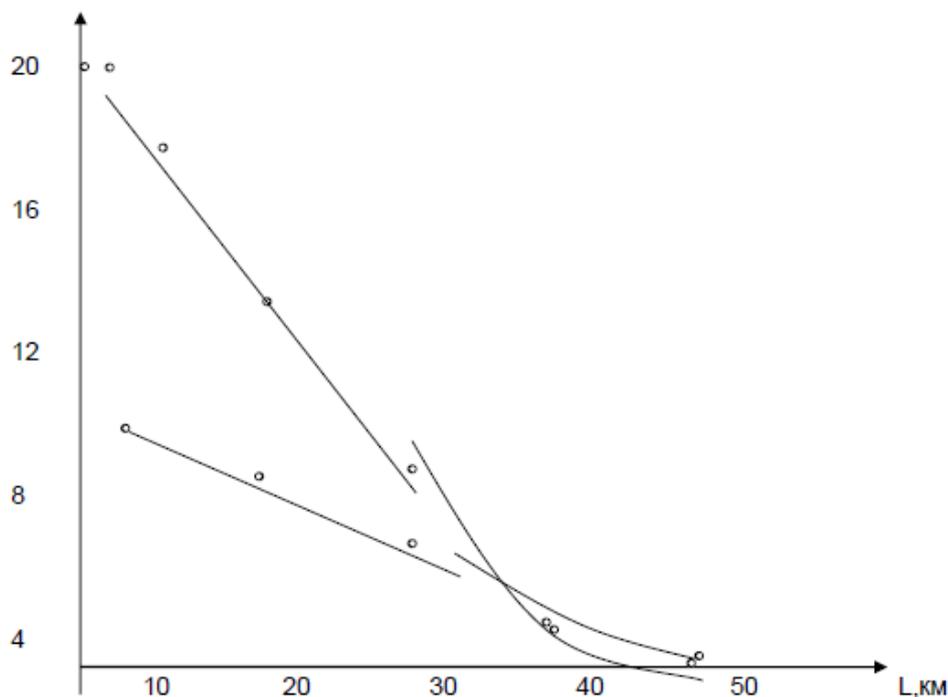


Рис 55. Зависимость числа колонок от расстояния между станциями

Анализ зависимостей показывает, что при увеличении расстояния между станциями число последовательно включенных в одно волокно оптических модулей ONU/T резко сокращается. При расстоянии более 40 км в одно волокно нельзя включить более 4 ONU/T. Это объясняется тем, что потери на ответвление в сплиттере становятся соизмеримыми с уровнем энергетического бюджета за вычетом потерь на прямое прохождение сигнала. Причем, в этом случае более предпочтительным становится применение сплиттеров с меньшим затуханием на выделение, так, например, в последовательной линейке длиной 40 км можно разместить ONU/T со сплиттерами 30/70 больше, чем со сплиттерами 10/90.

В связи с этим несомненный интерес представляет зависимость числа последовательно включенных модулей ONU/T N от коэффициента деления установленного при ONU/T сплиттера для разных длин участков (Рис 56).

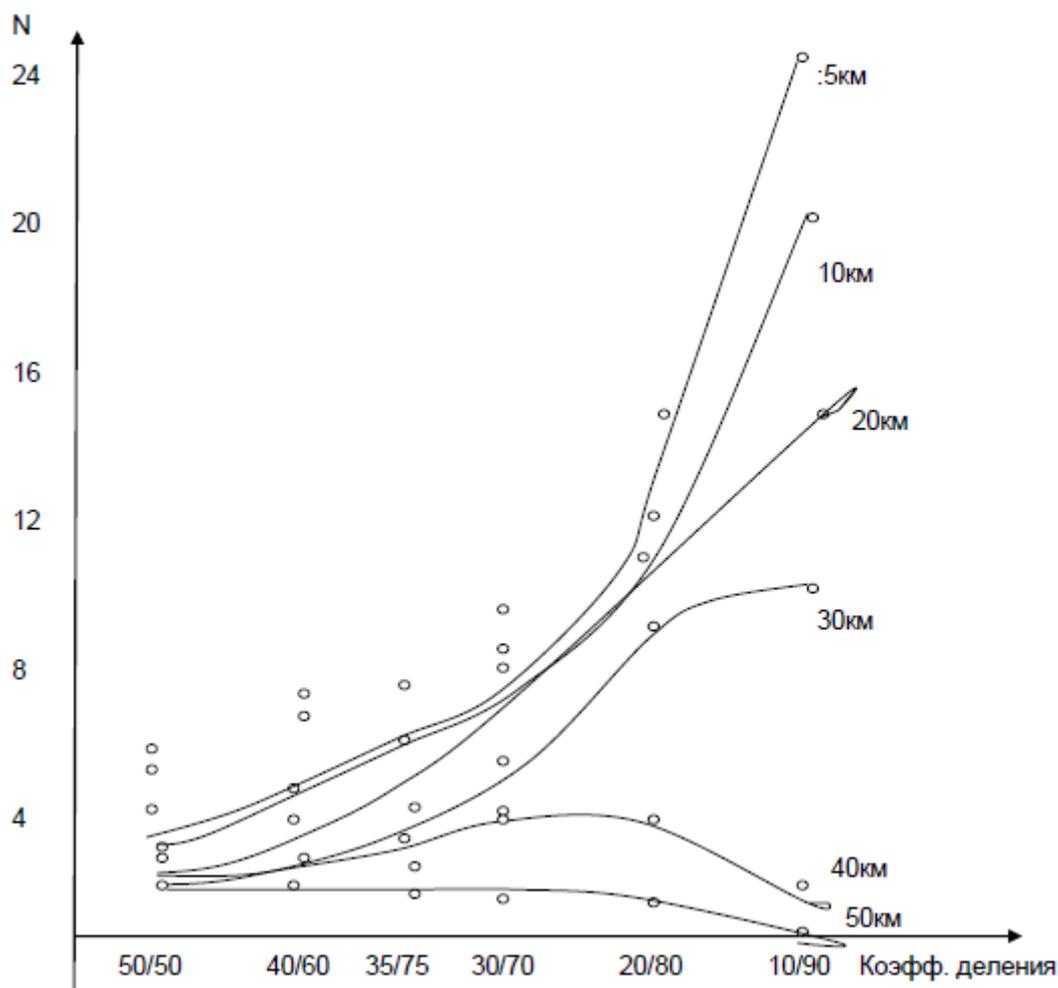


Рис 56 Зависимость числа последовательных ONU/T от коэффициента деления сплиттера

Табл 1.

Коэфф. деления сплиттера	Максимальное число последовательных модулей ONU/T N при L=						
	5 км	10 км	20 км	30 км	40 км	50 км	
50/50	[6,7]	[5,7]	[4,3]	[3,7]	[2,7]	[1,7]	
40/60	[8,5]	[7,2]	[5,8]	[4,6]	[3,1]	[1,83]	
35/65	[9,8]	[7,8]	[6,3]	[5,0]	[3,3]	[1,87]	
30/70	[11,4]	[9,5]	[7,6]	[5,9]	[3,8]	[1,92]	
20/80	[16,5]	[13,5]	[10,5]	[7,7]	[3,5]	[1,5]	
10/90	[27,3]	[21,3]	[15,3]	[9,8]	[3,3]	< 1	

[] – целая часть числа

Полученные соотношения показывают, что на участках малой и средней длины $L < 30$ км, когда затухание сплиттера на ответвление существенно меньше затухания в волокне, максимальное число последовательно включенных модулей N растет с увеличением коэффициента деления сплиттера. Далее, при увеличении длины участка относительный рост числа N уменьшается и, наконец, при длинах участка порядка 35 км и выше, когда потери на ответвление в сплиттере становятся соизмеримыми с уровнем

энергетического бюджета за вычетом потерь на прямое прохождение сигнала, наблюдается существование оптимального в смысле числа N коэффициента деления, который составляет величину 30/70.

6.2. Случай CWDM

Рассмотрим модель оборудования перегонной связи, построенного с использованием спектрального уплотнения CWDM (Рис 57).

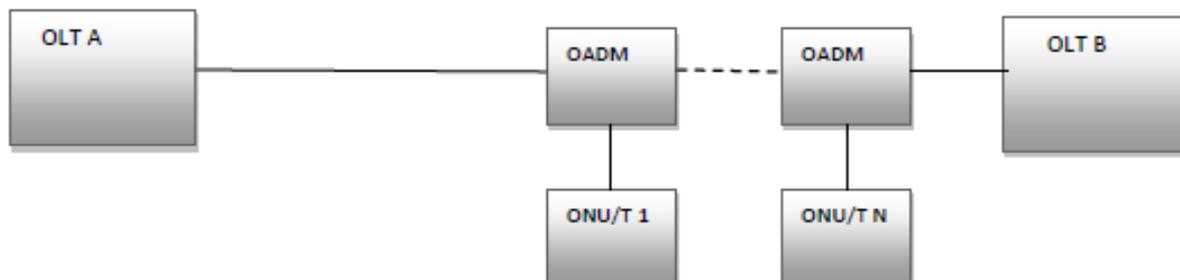


Рис. 57. Модель оборудования перегонной связи со спектральным уплотнением CWDM

В этом случае по волокну между станциями А и В передается спектрально уплотненный методом CWDM оптический сигнал со следующим, например, набором длин волн 1610/1470, 1590/1490, 1570/1510, 1550/1530, 1450/1370, 1430/1350, 1410/1330, 1390/1310 нм, содержащий 8 пар длин волн, что позволяет разместить в одном волокне 8 последовательных колонок.

Введем следующие обозначения и определения.

OADM – оптический мультиплексор с вводом/выводом одной пары длин волн.

В наихудших условиях по уровню приема находится последний от станции А модуль ONU/T N. Расстояние между станциями L км, расстояние между модулями около 1 км. Считаем $L \gg 1$, тогда расстояние до ONU/T N = L км.

Километрическое затухание волокна – a , дБ/км, затухание OADM на проход – b_1 , дБ, затухание OADM на выделение – c_1 , дБ.

Энергетический бюджет оптического трансивера – \mathcal{E}_6 , дБ, эксплуатационный запас на участок между двумя станциями – \mathcal{E}_3 , дБ.

Тогда аналогично Рис 54 можно написать, что энергетический бюджет линии ко входу последней колонки КПСО N не должен быть меньше, чем

$$\mathcal{E}_6 > \mathcal{E}_3 + aL + bN + c$$

Отсюда легко определяется соотношение для максимального числа последовательно включенных колонок КПСО

$$N < (\mathcal{E}_6 - \mathcal{E}_3 - aL - c)/b$$

Подставим сюда в качестве примера некоторые величины из нового проекта Архангельск - Карпагоры.

$\mathcal{E}_6 = 32,5$ дБ; $\mathcal{E}_3 = 3$ дБ; $a = 0,36$ дБ/км на длине волны 1310 нм; $c = 1,0$ дБ; $b = 0,8$ дБ для OADM мультиплексора

для разных значений длины участка между станциями. Тогда в худшем случае при длине волны 1310 нм будем иметь:

при $L = 30$ км $N < 22$
 при $L = 40$ км $N < 17$
 при $L = 45$ км $N < 15$
 при $L = 50$ км $N < 12$

В этом случае аналогично предыдущему максимально возможное число последовательно включенных модулей также уменьшается, однако, даже при расстоянии между станциями 50 км оно все равно больше 8 и равно числу пар длин волн при $L = 60$ км.

Размещение волновых каналов с разнесением 20 нм друг от друга накладывает определенные требования к величине затухания волновых фильтров в полосе задерживания. В частности, требования к затуханию фильтров в полосе задерживания будут составлять 45 дБ с тем, чтобы уровень перекрестной помехи был много ниже уровня шумов.

В качестве иллюстрации на рис 58 приведена зависимость уровня сигнала на входе приемника при различной длине переприемного участка относительно уровня переходной помехи и чувствительности приемника.

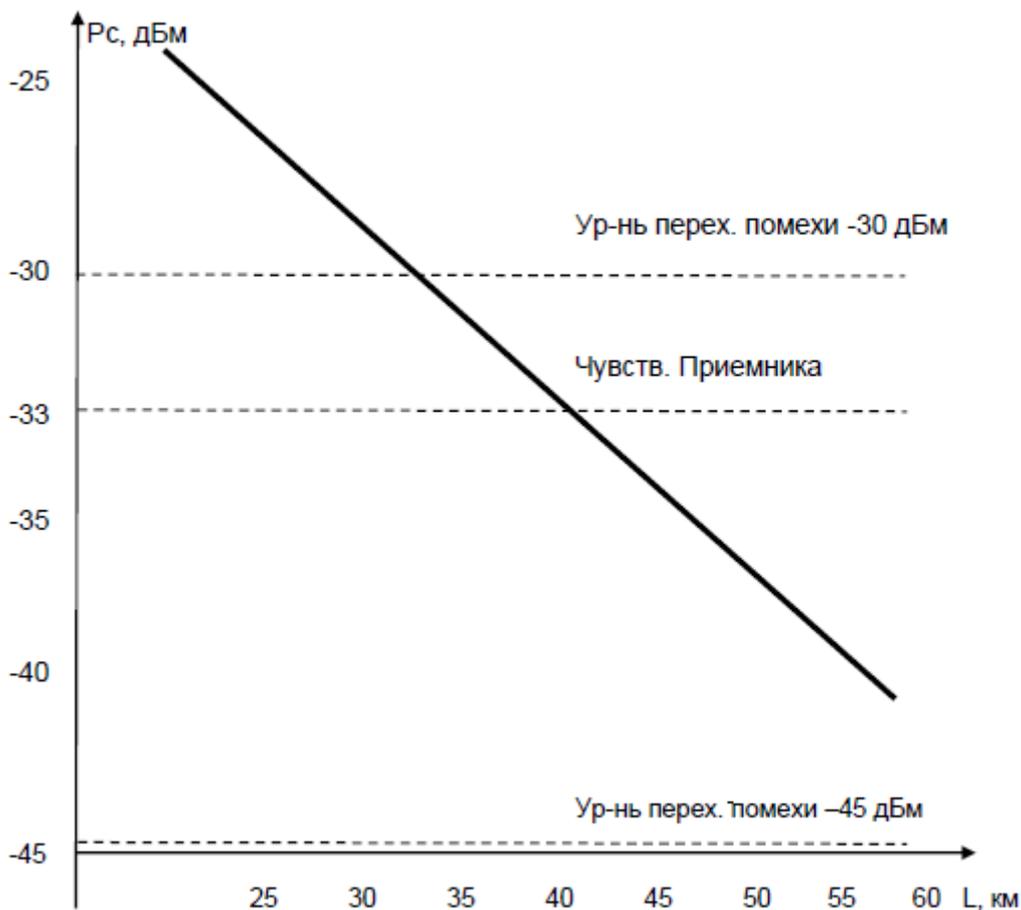


Рис 58. Зависимость уровня сигнала на входе фотоприемника от расстояния между станциями

Таким образом, расстояние между станциями 60 км может быть реализовано при подавлении оптическими фильтрами в OADM мультиплексоре переходной помехи до уровня – 45 дБм. В противном случае это расстояние не превысит 35 км.

7. Измерения на физическом уровне PON

Измерения на физическом уровне пассивной оптической сети должны выполняться при построении сети, сдаче ее в эксплуатацию, во время функционирования сети и в целях устранения неисправностей. Для этих целей используются различные методики тестирования, различное оборудование и инструменты.

Измерения на физическом уровне сети PON выполняются, начиная с построения сети. Для этого необходимо в первую очередь убедиться, что оптическое волокно и другие компоненты оптической сети подходят для передачи требуемых данных. Сеть со сварными соединениями можно тестировать только при ее построении и только на отдельных участках. При этом требуется двустороннее тестирование вносимого затухания (Insertion Loss – IL) и обратного затухания (Optical Return Loss – ORL), которые важны для передачи аналогового видеосигнала на длине волны 1550 нм.

При выполнении этих измерений необходимо учитывать требования для отдельных компонентов в соответствии со следующими стандартами и спецификациями:

- ITU-T 65x;
- Telecordia (GR-1209, GR-326, GR-196, GR-1312, и др.);
- IEC 60793, IEC 60874 и т. д.

Измерения на физическом уровне сети PON отличаются от остальных измерений в оптической сети вследствие некоторых специфических требований, связанных с ее топологией. В разделительной сети PON содержатся сплиттеры с коэффициентом деления 1:32 или 1:64, что, как правило, уменьшает мощность измерительного сигнала. Несмотря на то, что сплиттер является взаимнообратным элементом, при выполнении измерений со стороны OLT и ONU/T из-за различных топологий и различного волокна будут получены различные результаты. То есть, измерения должны обязательно выполняться на обеих сторонах. Еще одной дополнительной особенностью является возможность прокладки до пользователя двух волокон.

При запуске пассивной оптической сети необходимо также проверить баланс мощности (Power Budget), причем особое внимание следует уделить измерению минимального уровня передатчика и приемника с учетом заданной вероятности ошибок. При выполнении измерений в оптической сети распределения необходимо иметь в виду, что по сети передаются сигналы на трех различных длинах волн, поэтому результаты следует получить для всех трех длин волн. При выполнении измерений необходимо использовать выборочное измерение мощности. При проверке уровней мощности в работающей сети имеются еще две особенности, которые не встречаются в других оптических соединениях. Одной из особенностей является импульсный тип трафика (выбросы). Вторая особенность относится к зависимости наличия сигнала на длине волны 1310 нм от предшествующего сигнала на длине

волны 1490 нм. Так ONU/T передает сигнал на длине волны 1310 нм только после получения сигнала на длине волны 1490 нм от OLT.

В процессе эксплуатации необходимо использовать измерительное оборудование, обеспечивающее техническое обслуживание и автоматическое обнаружение ошибок, возникающих в сети распределения. При обнаружении ошибок сеть должна обеспечить автоматическую защиту трафика и переключение его на альтернативные маршруты.

Для обнаружения ошибок в пассивной оптической сети необходимо использовать эффективные методы обнаружения и соответствующее измерительное оборудование. В качестве измерительного оборудования применяются выборочные измерители мощности и оптические рефлектометры.

7.1. Оптические измерительные инструменты

7.1.1. Измерение затухания

Измерение затухания оптического сигнала необходимо для оценки работы оптической сети распределения в зависимости от требуемого баланса мощности. Затухание проще всего измеряется с помощью оптического источника и измерителя оптической мощности, подключаемых на различных концах пассивной оптической сети. При этом с одной стороны по сети передается оптический сигнал определенной мощности, а на другой стороне выполняется измерение мощности принятого сигнала. Разница между мощностью переданного и принятого сигналов представляет собой затухание в дБ:

$$\text{Затухание } (\lambda)[\text{дБ}] = P_{\text{прд}}[\text{дБм}] - P_{\text{прм}}[\text{дБм}]$$

Поскольку передача информации в пассивной оптической сети выполняется на трех длинах волн, необходимо измерения провести на длинах волн 1310 нм, 1490 нм и 1550 нм. Передатчик измерителя имеет три источника света по одному для каждой длины волны. Более дешевые варианты измерителей имеют только один фотодиод. Поскольку чувствительность фотодиода зависит от длины волны, он должен быть настроен на все три длины волны, а оператор должен правильно определить диапазон измерений. Некоторые приемники могут сами определять длину волны, благодаря чему упрощается общая процедура проведения измерений. Для определения длины волны в каждом источнике света выполняется определенная модуляция оптического сигнала. Фотодиод, который распознает заранее определенную модуляцию, таким образом, получает информацию о том, для какого диапазона длин волн ему необходимо отобразить результаты. Несмотря на это, измерения занимают немало времени, поскольку затухание необходимо измерять с обеих сторон оптической сети распределения.

Для измерения затухания рекомендуется использовать измерительный инструмент, оборудованный передатчиком и приемником в одном модуле (Рис 59). При использовании двух таких инструментов можно измерить затухание в

обоих направлениях путем простого переключения приема/передачи в каждом из модулей.

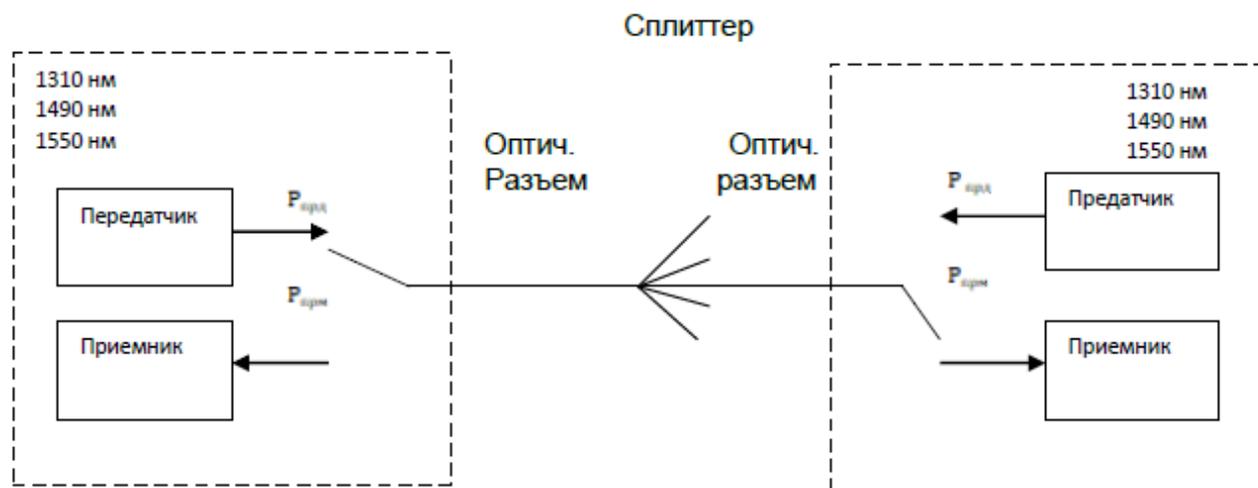


Рис. 59. Измерение затухания в оптической сети распределения

7.1.2. Оптический измеритель мощности

При построении пассивной оптической сети или при устранении возможных неисправностей в сети также необходимо выполнить измерение оптической мощности. Измерение мощности производится на стороне OLT и ONU/T. Для измерения мощности применяются специальные двусторонние измерители, поскольку обычные измерители мощности не способны выполнять такие измерения.

Специальный измеритель только с одним фотодиодом для этого не подходит, так как он не обеспечивает одновременного измерения на всех трех длинах волн. Функция одновременного измерения мощности двунаправленного трафика не только уменьшает время измерения, но и обеспечивает верность измерения. Одновременное измерение на всех трех длинах волн обязательно, поскольку восходящий сигнал на длине волны 1310 нм присутствует только в том случае, если перед этим был нисходящий сигнал на длине волны 1490 нм. То есть измеритель мощности должен работать так, чтобы во время измерения проходил как нисходящий, так и восходящий трафик. Для этого перед измерителем должен быть встроен направленный ответвитель (Рис 60). Ответвитель пропускает трафик и позволяет выполнять измерения на ответвленной линии. Без использования направленного ответвителя измерения на длине волны 1310 нм выполнить невозможно.

Измерение сигнала на длине волны 1310 нм ввиду неравномерности трафика (выбросы) имеет дополнительную специфику. Обычные измерители мощности отображают среднее значение измеренной мощности. В случае выбросов в структуре сигнала использование среднего значения невозможно. Необходимо, чтобы измеритель показывал среднее значение пиковой мощности, так как это значение очень важно при проверке работы ONU/T, находящихся на различном удалении от OLT.

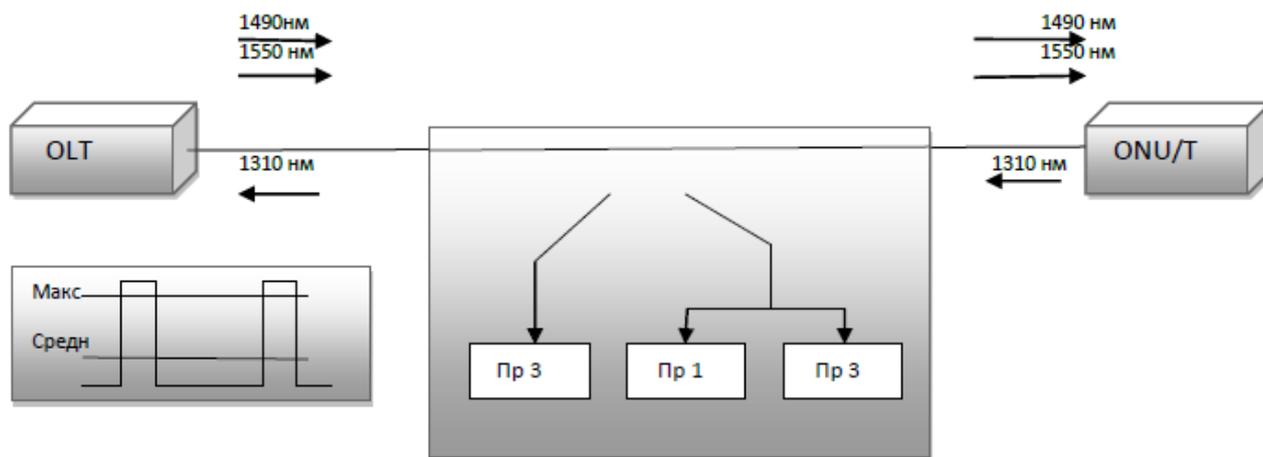


Рис 60. Измерение мощности в PON с помощью выборочного измерителя мощности

Таким образом, для выполнения измерений в PON необходим выборочный измеритель мощности с тремя длинами волн. Он должен обеспечивать измерение восходящего трафика на длине волны 1310 нм и нисходящего трафика на длинах волн 1490 нм и 1550 нм. На длине волны 1550 нм должно обеспечиваться измерение пиковой оптической мощности (+26 дБм), поскольку на стороне OLT он подключается сразу за оптическим усилителем.

При использовании выборочного измерителя мощности с возможностью измерения мощности на всех трех длинах волн выполнять измерения становится очень просто. Основным недостатком данного измерителя является то, что он не представляет никакой информации о том, какие элементы сети вносят больше всего затухания и должны быть заменены. Для этих целей необходимо пользоваться оптическим рефлектометром.

7.2. Оптический рефлектометр

7.2.1. Оптический рефлектометр во временной области

Для измерения параметров волокна следует использовать процедуру, которая позволяет проводить измерения на закопанном волокне с доступом с одной стороны. Такое измерение называется рефлектометрическим. Оно выполняется путем посылки оптического сигнала с заданными параметрами на одном конце волокна и наблюдения на том же конце, какие сигналы будут возвращены из-за различных отражений по истечении определенного времени.

При рефлектометрическом измерении во временной области (Optical Time-Domain Reflectometry – OTDR) по волокну передается короткий оптический импульс. Этот импульс в процессе передачи отражается от мест с плохим соединением. Наибольшее отражение происходит на неподключенном конце волокна при переходе из стекла в воздух. Отраженный сигнал поступает обратно к источнику.

Соответствующий измеритель (Рис 61), включающий в себя передатчик оптических импульсов, направленный ответвитель, оптический приемник и отображение результата, называется оптическим рефлектометром (OTDR).

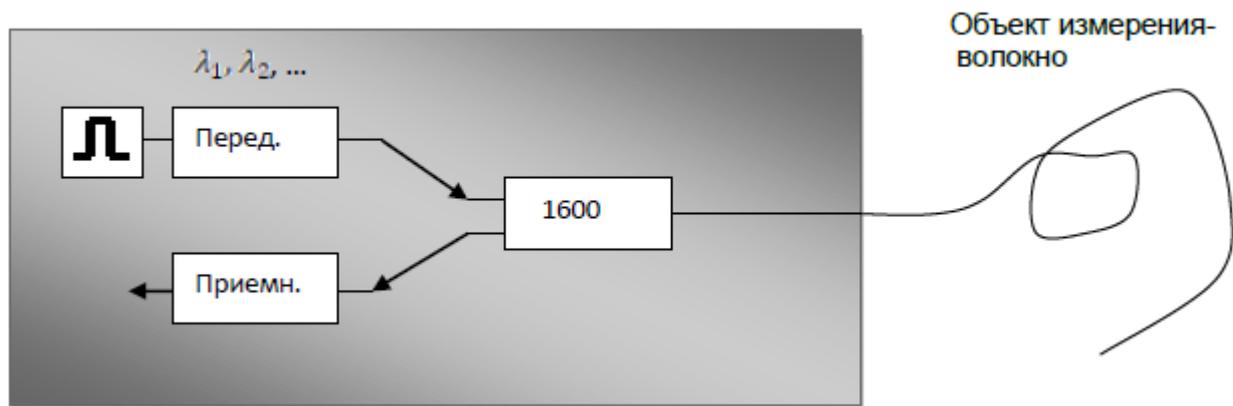


Рис. 61. Оптический рефлектометр во временной области

Отдельные отраженные сигналы различаются по времени поступления в приемник, поскольку каждый сигнал должен пройти путь от передатчика до точки отражения и обратно до источника. На основании измеренного времени между отражением импульса и его приемом можно рассчитать место его возникновения, то есть место неоднородности на оптической линии. При этом следует иметь в виду, что скорость света в волокне меньше на коэффициент преломления волокна n скорости света в вакууме. Поэтому в измерителе OTDR обязательно необходимо определить коэффициент преломления сердцевины оптического волокна, который для стандартного одномодового волокна составляет 1,451.

Обратный сигнал после выявления анализируется с помощью сигнального процессора и отображается по логарифмической шкале (Рис. 62). Поскольку рэлеевское рассеяние света не меняется на протяжении всего волокна, то по наклону линии по логарифмической шкале можно определить затухание в дБ на км.

Различные события на трассе дают различные результаты. Отражение на сварных соединениях обычно очень мало, но при этом все равно заметно. Как правило, сварные соединения становятся причиной потерь. При наличии виртуального усиления сигнала можно сделать вывод, что соединение выполнено с использованием волокон с различным коэффициентом обратного отражения света в волокно. Поэтому во избежание таких нежелательных явлений измерение необходимо выполнять на обеих сторонах и определять точное значение затухания на основе среднего значения обоих измерений.

Как и сварные соединения, искривления оптического волокна создают виртуальные потери, которые невозможно отличить от сварных соединений на основании одного измерения. Поскольку сигналы различных длин волн на искривлениях имеют различные потери, то такие события можно выявить только посредством проведения измерений на нескольких длинах волн. Также отраженные сигналы на более длинных волнах имеют большее затухание.

Разъемные соединения, в которых сигнал переходит на другую оптическую среду, становятся источником не только потерь, но и отражения. Подобное отражение (только большее) возникает на конце оптического волокна

при переходе света из стекла в воздух. Отраженный сигнал от неподключенного конца может также частично отражаться от последнего разъемного соединения, создавая таким образом виртуальные события за пределами трассы.

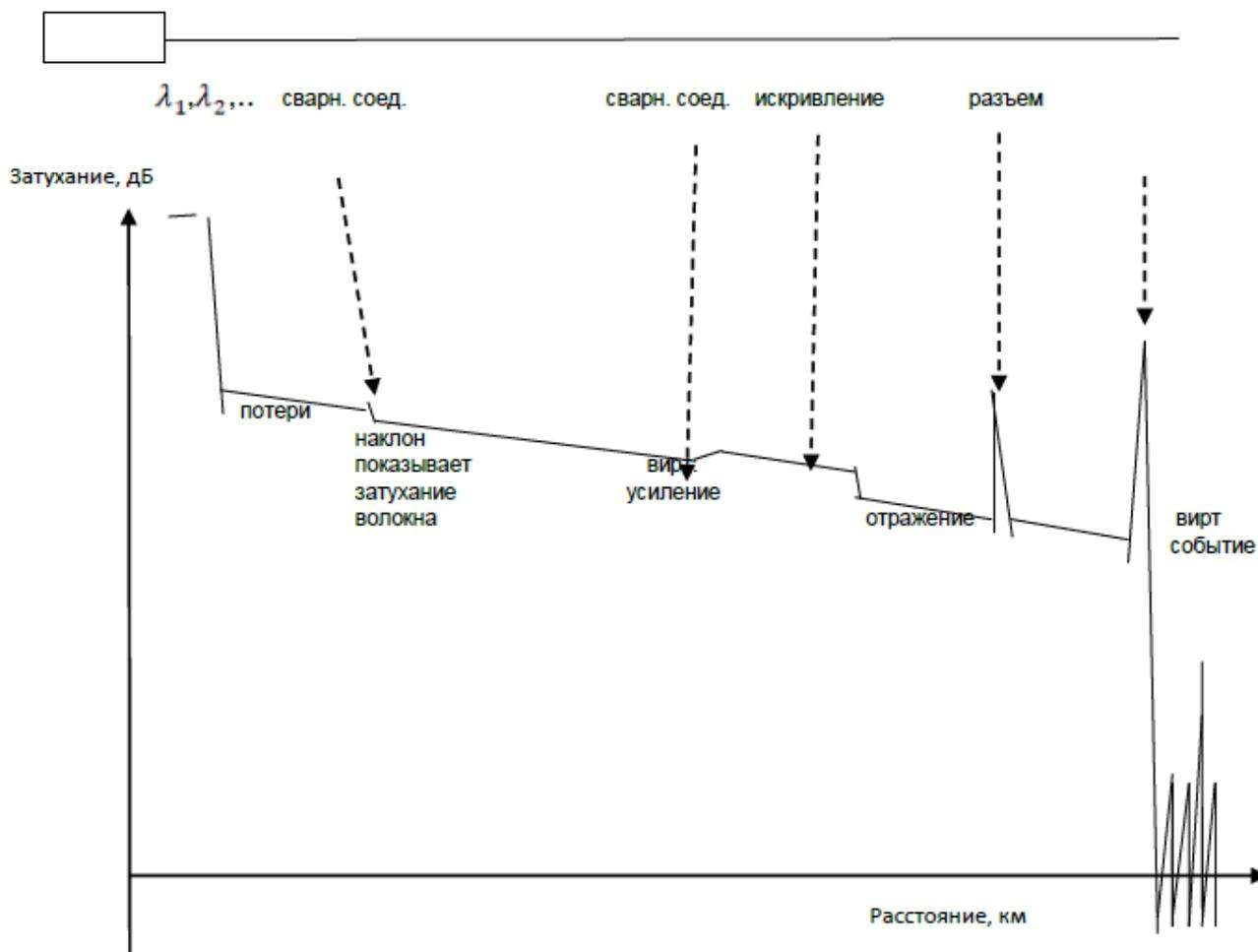


Рис. 62. События на трассе при выполнении измерений OTDR

Детектор приемника должен быть достаточно чувствительным, поскольку отражения имеют очень малую мощность. Самое сильное отражение возникает на конце волокна, на границе между стеклом и воздухом. Отражения на качественных разъемах малы. Слабее всего релеевское рассеяние, поскольку оно является основным механизмом потерь в качественных оптических волокнах. Большая части рассеяния выходит за пределы волокна и лишь менее 1% попадает обратно в волновод.

Таким образом, в рефлектометре необходимо использовать лазер с как можно большей выходной мощностью, ограничиваемой конструкцией полупроводникового лазера и возникновением нелинейных явлений в волокне при мощности от 10 до 100 мВт.

Основным ограничением рефлектометра является дальность действия, поскольку сигнал рефлектометра должен преодолеть одно и то же расстояние дважды. При определении дальности действия нельзя забывать о потерях в направленном ответвителе. Поскольку направленный ответвитель представляет

собой взаимобратный элемент, то потери составляют как минимум 6 дБ (3 дБ на передаче и 3 дБ на приеме).

Ввиду ограниченности пиковой мощности лазера уменьшается дальность действия рефлектометра с сокращением импульсов. С уменьшением импульсов при неизменной пиковой мощности лазера уменьшается энергия сигнала, доступная для измерения. Вместе с тем с сокращением импульса увеличивается требуемая полоса пропускания и шум приемника. Создание же очень коротких световых импульсов представляет собой трудную задачу.

Когда разрешение рефлектометра требуется меньше нескольких метров, то есть продолжительность импульса составляет менее нескольких десятков наносекунд, дальность действия измерителя OTDR становится неприемлемой для практического применения. Техническое решение проблемы известно из области радиолокационной техники: для больших расстояний применяется радар с амплитудной модуляцией (AM), а для небольших расстояний с большим разрешением более подходит радар с частотной модуляцией (FM).

7.2.2. Оптический рефлектометр в частотной области

Большое пространственное разрешение может быть достигнуто с помощью оптического рефлектометра в частотной области (Optical Frequency-Domain Reflectometer – OFDR), показанного на Рис 63. Также, как и рефлектометр OTDR рефлектометр OFDR включает в себя источник света, направленный ответвитель и оптический приемник. В отличие от OTDR в OFDR выходной сигнал приемника для отображения результата измерения необходимо соответствующим образом обработать.

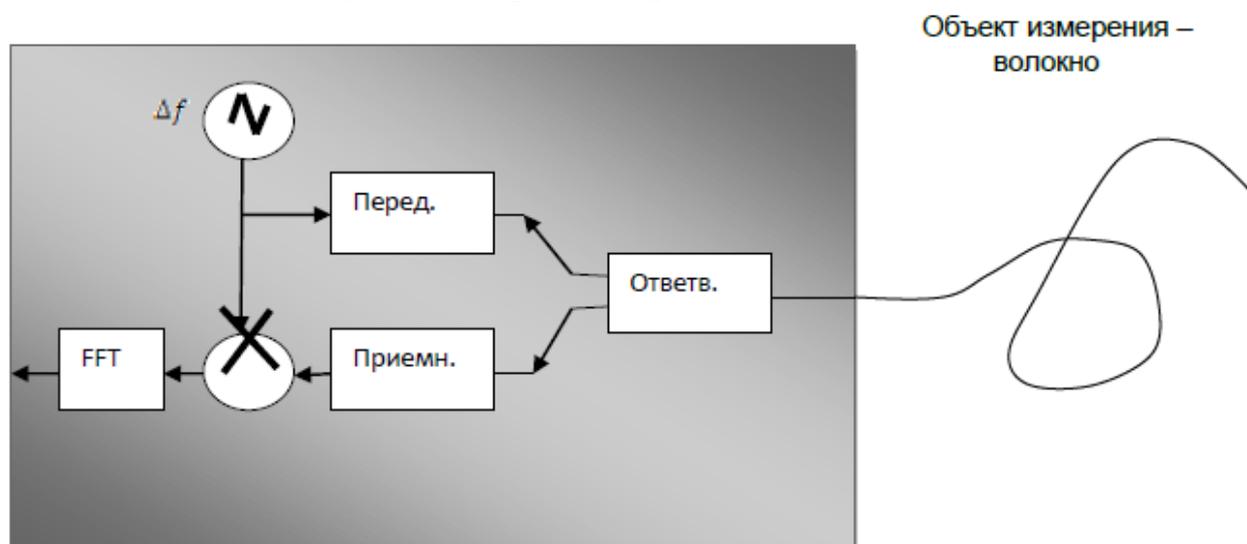


Рис. 63. Оптический рефлектометр в частотной области

При рефлектометрическом измерении в частотной области по оптическому волокну передается сигнал с известными параметрами, являющийся не световым импульсом, а оптическим сигналом, модулированным посредством синусоидального сигнала переменной частоты. Синусоидальный сигнал генерируется радиочастотным генератором качающейся частоты (sweep

generator). Частота передаваемого сигнала изменяется во времени. Модулированный оптический сигнал передается через волоконный направленный ответвитель в волокно, объект измерения, где из-за релеевского рассеяния отсутствие соединения на конце частично отражается в обратную сторону. Отраженный сигнал проходит двойной путь и через направленный ответвитель попадает в оптический приемник.

Частота принятого сигнала отличается от частоты передаваемого сигнала. В течение того времени, пока оптический сигнал передавался по волокну до конца волокна и обратно, частота генератора уже изменилась. В результате принятый сигнал имеет отличную от сигнала, поступающего непосредственно на устройство смещения частоту. Измеритель смешивает принятый сигнал с сигналом передачи и с помощью фильтра нижних частот уравнивает все продукты смешения, кроме разницы частот. Различные частотные сигналы при смешивании генерируют низкочастотный сигнал. Если рассмотреть частотный спектр низкочастотного продукта смешения, то можно увидеть пики, соответствующие расстоянию между началом и концом волокна.

Частоты сигналов равны целому диапазону частот Δf , посылаемых генератором в течение одного периода T , умноженному на отношение полной задержки в обоих направлениях к периоду генератора качающейся частоты

$$f_t = \Delta f \frac{2t}{T}$$

Такой рефлектометр с колебательной модуляцией на практике не используется, поскольку его динамический диапазон слишком мал, чтобы было заметно релеевское рассеяние.

OFDR с колебательной несущей также на практике не применяется, так как генератор распознает релеевское рассеяние, но его дальность действия ограничивается когерентной длиной лазера.

7.3. Измерения в оптической сети распределения на этапе построения сети

В процессе построения сети необходимо выполнить следующие измерения:

- потери в волоконной инфраструктуре
- доступная оптическая мощность

Доступная мощность измеряется с помощью описанного ранее специального измерителя мощности PON. Потери в волоконной инфраструктуре проще всего измерять с помощью измерителя OTDR. При этом измерения в пассивной оптической сети можно выполнять по участкам или через сплиттер. При наличии встроенного сплиттера измерения можно выполнять из OLT или ONU/T.

Измерение отдельных частей сети без оптического сплиттера (Рис. 64) можно выполнять только на начальном этапе построения сети, пока участки фактически не соединены между собой. На последующих этапах построения сети отдельные участки сети чаще всего свариваются между собой, поскольку сварные соединения имеют меньшее затухание, чем разъемы. Лишь иногда

операторы используют для построения сети разъемные соединения, поскольку это увеличивает объем необходимых инвестиций, а также может стать причиной возникновения ошибок в будущем. В конце построения сети доступ к точкам для проведения измерений усложняется, поскольку волокна необходимо разделять физически. Однако измерение по участкам имеет преимущество перед другими измерениями. С учетом небольшого вносимого затухания волокна без сплиттера для проведения измерений достаточно использовать более дешевый OTDR с динамическим диапазоном 30 дБ.

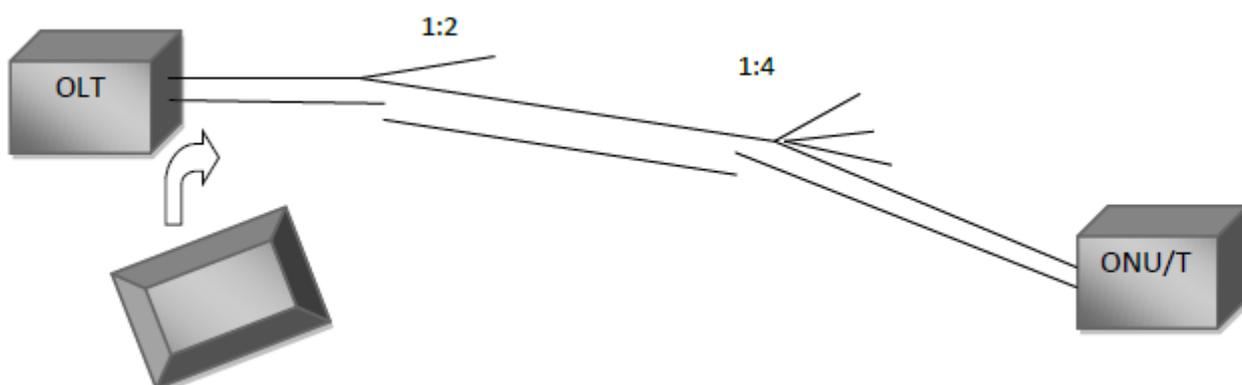


Рис. 64. Измерение OTDR по участкам

Оператору удобнее всего выполнять измерения со стороны OLT (Рис 65) поскольку в этом случае легко обеспечить доступ к оборудованию. Но при измерении со стороны OLT возникает целый ряд неудобств, связанных с топологией сети. Такое измерение можно проводить только в том случае, когда обеспечивается прерывание связи на общем волокне, то есть между OLT и сплиттером.

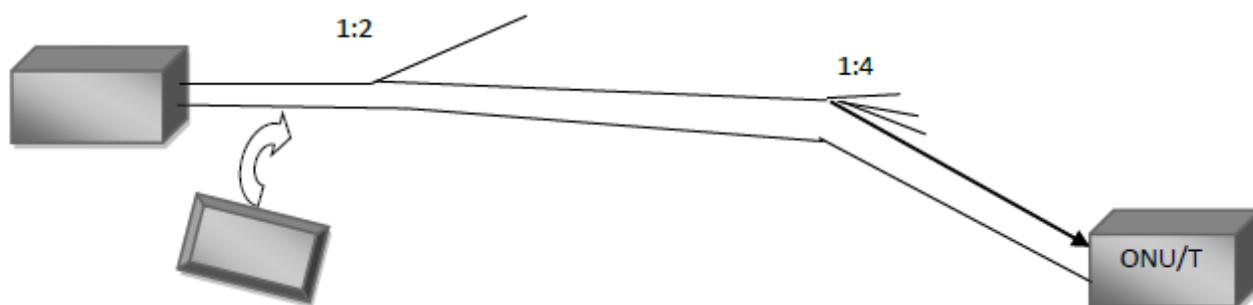


Рис. 65. Измерение OTDR через сплиттер со стороны OLT

Измеренный трафик всей наблюдаемой трассы не подходит для изучения, поскольку на общей части волокна, как правило, ничего не происходит, а в представляющей интерес части, т. е. ближе к пользователям мощность уже сильно падает из-за применения сплиттера. Из-за высокого вносимого затухания сплиттеров OTDR должен иметь динамический диапазон как минимум 35 дБ, что подразумевает применение более дорогого оборудования для тестирования. Выявление отдельных абонентских веток представляет сложность, если их длина отличается менее, чем на 35 м. OTDR кроме большого динамического диапазона должен иметь очень хорошее разрешение и

быстродействующий фотодиод. Поскольку при повреждении одного абонентского волокна происходит перекрытие различных отражений, проведение измерений со стороны OLT не обеспечивает достоверных результатов. По причине множественного релеевского рассеяния в отдельных ветках невозможно оценить затухание волокна на расстоянии.

С точки зрения результатов измерения лучше выполнять измерения со стороны ONU/T (Рис. 66). Однако в большинстве случаев доступ к ONU/T затруднен, поскольку это оборудование устанавливается в доме у пользователя. Во избежание этого имеет смысл использовать оптическое соединение, которое будет обеспечивать подключение измерительного оборудования до входа в жилое помещение. Подобно предыдущему примеру здесь также имеется недостаток: из-за большого вносимого затухания сплиттеров необходимо иметь OTDR с динамическим диапазоном не менее 35 дБ. Основным преимуществом такого способа является то, что конец волокна за сплиттером можно легко обнаружить, поскольку он единственный. Результаты такого измерения могут быть использованы в качестве эталонных значений при дальнейшем техническом обслуживании сети и возможном устранении неисправностей.

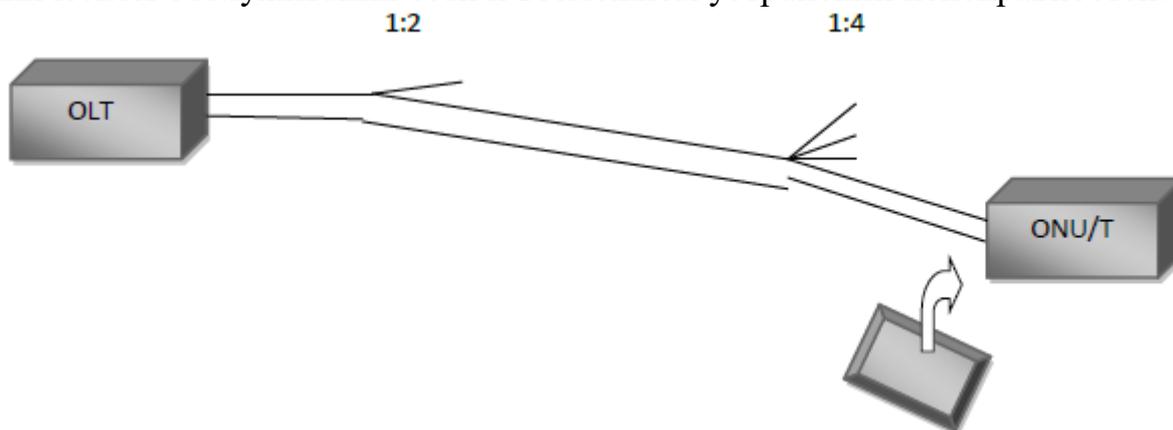


Рис 66. Измерение OTDR через сплиттер со стороны абонента

8. Техническое обслуживание и контроль PON

В то время как постоянное подключение абонентов к широкополосной пассивной оптической сети становится все более актуальным, увеличивается необходимость постоянного или как минимум периодического контроля состояния оптических соединений (волокон) и обнаружения ошибок. При помощи одного лишь правильного технического обслуживания можно обеспечить высокое качество и производительность пассивной оптической сети. Ниже приводятся отдельные процедуры технического обслуживания и их цель, а также контроль пассивной сети с помощью оптического рефлектометра.

8.1. Техническое обслуживание PON

Процедуры технического обслуживания в оптических сетях определяются ИТУ-Т в рекомендациях L.25. Они подразделяются на две большие группы: превентивное техническое обслуживание (до возникновения ошибок) и восстановительное техническое обслуживание (обслуживание после возникновения ошибок). Для каждой группы определено три шага:

1 шаг. Наблюдение:

- обнаружение ошибки или состояния, делающего невозможным передачу сигнала в отдельном элементе сети (например, повышенные потери на изгибе – предотвращение);
- получение аварийного сигнала или сообщения об ошибке и активирование процедуры восстановления первоначального состояния (восстановление).

2 шаг. Испытание:

- определение места ошибки или аномалии на основании измерений (предотвращение);
- тестирование свойств сегмента после устранения ошибки (восстановление).

3 шаг. Контроль и устранение ошибки:

- идентификация волокна и возможность тестирования соединения (устранение ошибки, восстановление).

Остальные процедуры технического обслуживания, не перечисленные в рекомендациях ИТУ-Т, но являющиеся ключевыми для правильного функционирования сети - это конфигурация, защита и управление сетью. При проведении технического обслуживания необходимо обращать внимание на то, чтобы работы по обслуживанию не оказывали влияния на работающую сеть, а превентивные процедуры не изменяли свойств соединений.

8.2. Контроль PON

Распространение PON привело к появлению новой концепции тестирования и контроля сетевых соединений. Эффективный контроль PON – это систематическое и централизованное исследование работы сети. Из-за размеров сети наиболее подходящим местом для контроля является

центральная станция (Central Office – CO). В противном случае необходимо усовершенствовать сеть или измерительное оборудование, поскольку из-за пассивных свойств PON невозможно, за исключением длины отдельных ветвей различать ветви сети между собой.

Кроме физического контроля с помощью оптического рефлектометра можно обнаруживать ошибки и с помощью используемых протоколов. Протоколы позволяют обнаруживать ошибки, но не позволяют обнаруживать место их возникновения.

8.2.1. Контроль при помощи ожидаемых отражений

Простой способ контроля безошибочной работы оптических проводников в PON с помощью OTDR основан на проверке ожидаемых отражений на концах ветвей (Рис 67). OTDR работает на измерительной длине волны 1625 нм и подключается к PON на стороне станции через ответвитель WDM. Ответвитель WDM отделяет измерительный сигнал λ_m от коммуникационных сигналов на трех длинах волн. При использовании данного способа контроля очень важно, чтобы оператор имел архив записей всех отражений, присутствующих в контролируемой сети. Аномалия в сети обнаруживается на основании изменения отдельного отражения, вызванного этой аномалией.

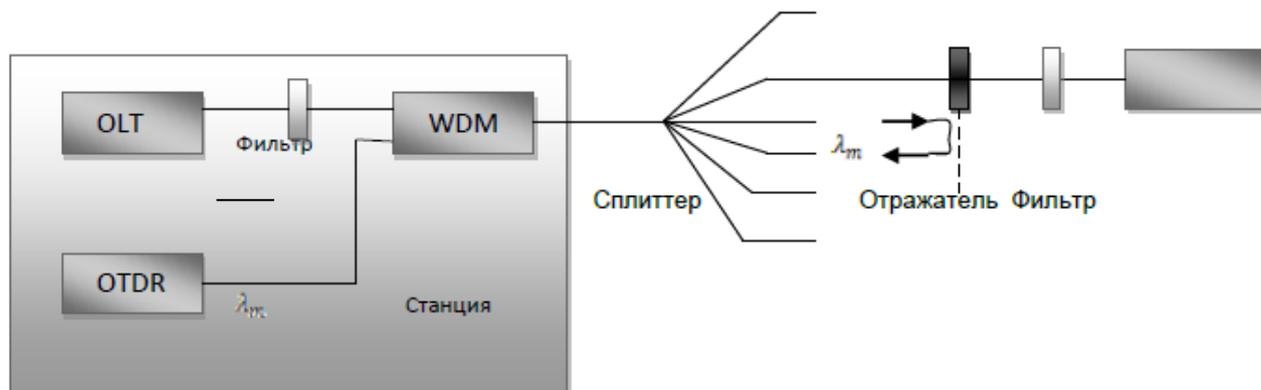


Рис 67. Контроль при помощи ожидаемых отражений

В соответствии с размером и удаленностью отражения можно различать отдельные ветви. Сложности наступают в случае определения места ошибки, не вызывающей отражения, а также в случае потерь, присутствующих на всем протяжении соединения. При ошибках такого рода ветвь, в которой возникла ошибка, можно определить на основании более детального анализа конечных ожидаемых отражений.

Если требуется обеспечить достаточно сильное отражение от отдельного абонента, то для его усиления следует использовать отражатели. Для такого контроля необходимо провести подготовительные работы в сети. Отражатели могут быть встроены в сеть множеством способов. Они могут быть установлены на входных разъемах ONU/Т и могут выполнять функции фильтров, пропускающих только сигналы с длинами волн 1310 нм, 1490 нм и 1550 нм и отражающих тестовый сигнал с длиной волны 1625 нм. Вторая

возможность заключается во встраивании отражателей в модуль WDM (см. Рис 68)

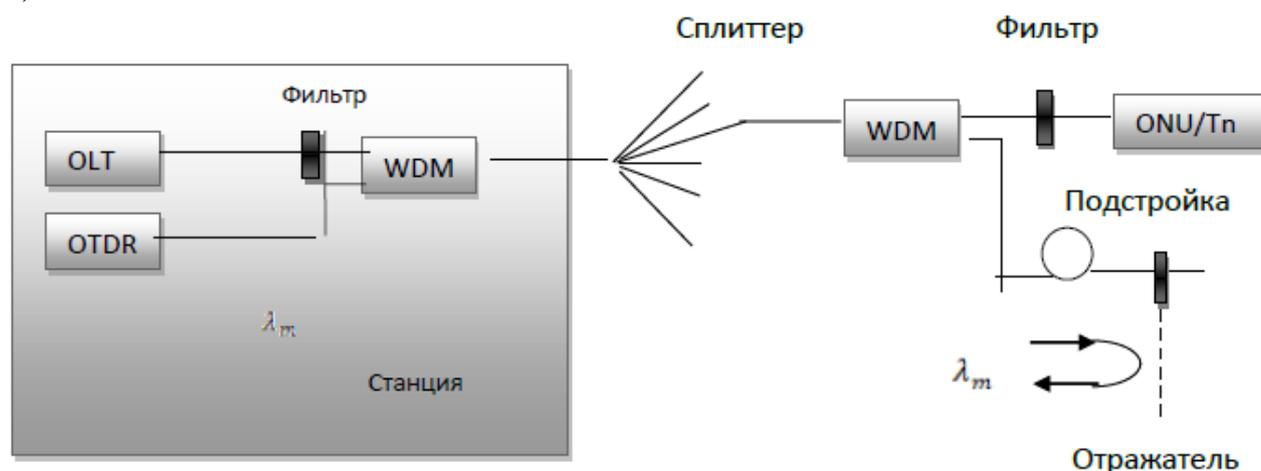


Рис 68. Контроль на основании ожидаемых отражений после подстроечной катушки

Недостатком такого способа является необходимость предварительной подстройки длины каждой ветви во избежание перекрытия отражений во времени. Перекрытия можно избежать также за счет использования отражателей с регулируемой длиной волны, когда для каждой ветви устанавливается отдельная длина волны. В этом случае необходимо использовать OTDR, позволяющий регулировать длину волны. Вместо OTDR может использоваться EDFA, представляющий своей спонтанной эмиссией передающую систему, и оптический спектральный анализатор для приема отраженного света.

8.2.2. Контроль на основе выбора соединения

Для контроля отдельной ветви PON можно использовать оптический коммутатор (см. Рис. 68). Способ обнаружения и определения местоположения ошибок аналогичен ранее описанным методикам, предусматривающим использование OTDR в качестве основного измерительного оборудования. Оптический коммутатор может быть реализован в виде механического коммутатора или же любым другим способом, обладающим свойством селективности. Его задача заключается в выполнении переключения между отдельными ветвями пассивной оптической сети с помощью соответствующего управления.

Подключение механизма контроля на основе выбора соединения легко реализовать в том случае, если пассивная оптическая разветвляется непосредственно на станции, что не является наиболее частым случаем реализации сети. Обычно разветвление выполняется вблизи абонентов (Рис.69), и в этом случае оптический коммутатор следует разместить вблизи сплиттера (Рис 70). Здесь необходимо найти решение для управления и питания коммутатора на удаленном объекте.

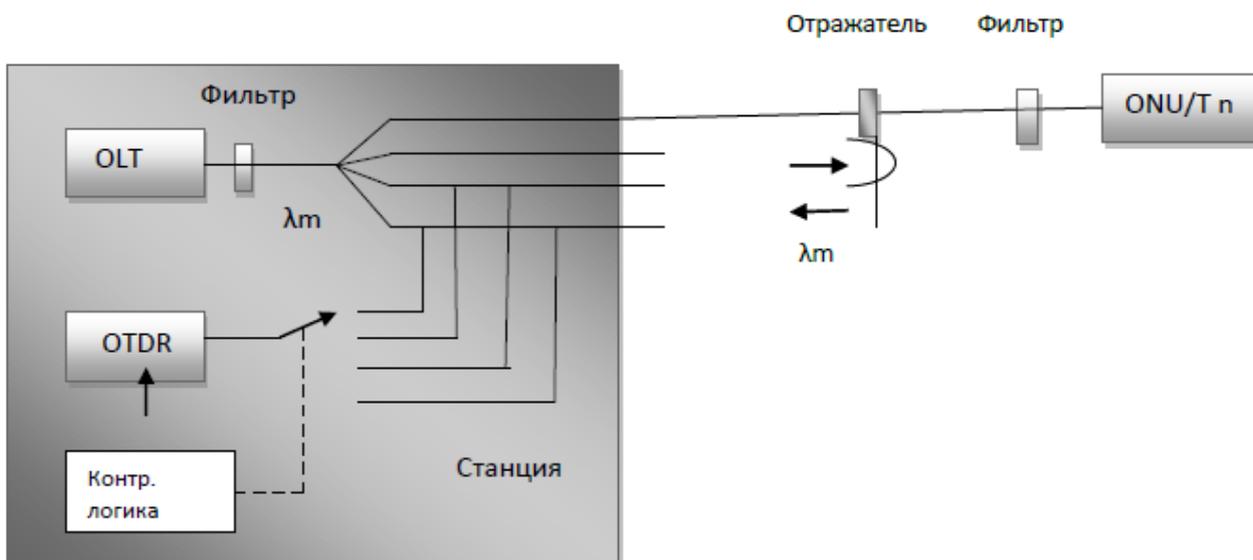


Рис. 69. Контроль на основе выбора соединения при помощи оптического коммутатора на центральной станции

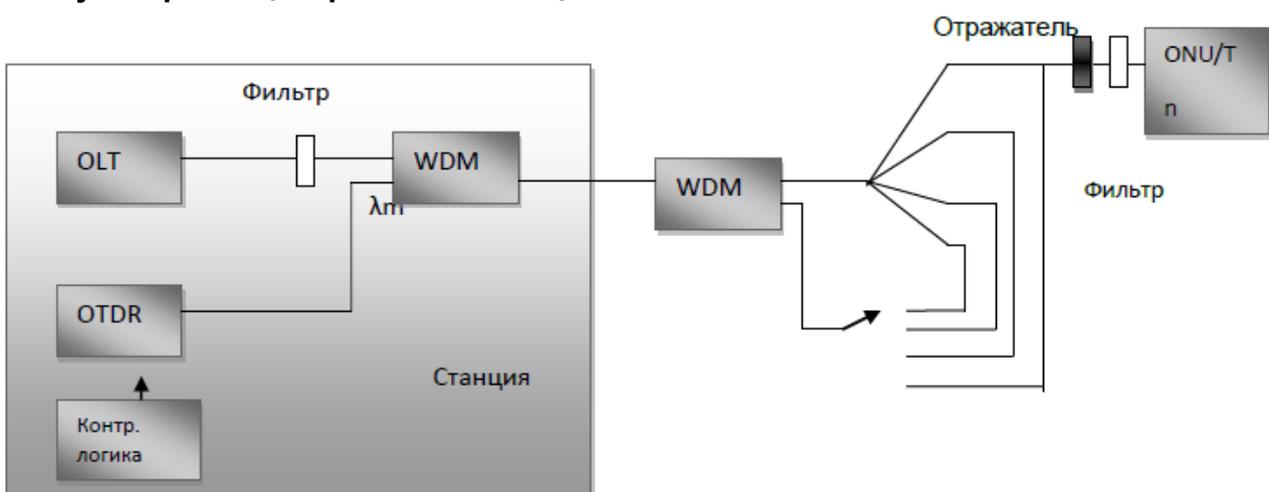


Рис. 70. Контроль на основе выбора соединения при помощи оптического коммутатора вблизи сплиттера

8.2.3. Контроль с разделением по длине волны

При контроле с разделением по длине волны используется тестовый сигнал различных длин волн (Рис. 71). При помощи маршрутизатора WDM сигналы различных длин волн посылаются в разные ветви PON. Источником тестового сигнала является OTDR с возможностью изменения длины волны в диапазоне от 1625 нм до 1650 нм, в котором работает и распределительная решетка на основе массива волноводов (Arrayed-Waveguide Grating – AWG). AWG работает как маршрутизатор сигналов различных длин волн. Путем выбора длины волны можно контролировать отражения в отдельной ветви. Анализируя полученные отражения, можно обнаружить наличие возможных ошибок в сети

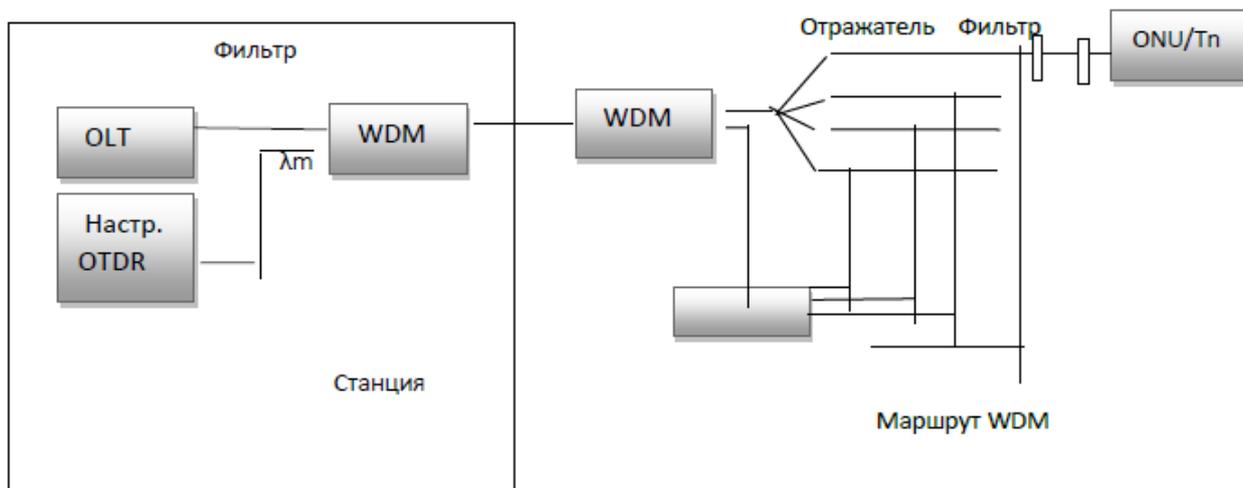


Рис. 71. Контроль при помощи разделения по длине волны

При использовании контроля с разделением по длине волны питание и управление для удаленного узла не требуются, поскольку маршрутизатор WDM является полностью пассивным элементом. Конечно же, в этом случае при монтаже сети, кроме сплиттера необходимо также смонтировать дополнительный элемент (AWG), что существенно повышает стоимость распределительной сети.

8.2.4. Контроль с использованием рефлектометра

Встроенные в ONU/T рефлектометры, по сравнению с обычными системами контроля, не требуют ни дорогого измерительного оборудования OTDR, ни сложной конфигурации сети. При помощи этого способа возможен непрерывный контроль всех оптических соединений в сети доступа на обеих сторонах. При этом используются две методики рефлектометрического контроля, независимые от системных протоколов.

Методика отдельного импульса (single pulse method), показанная на Рис 72, используется в системах, в которых приходится иметь дело с выбросами данных (burst mode system). Примером такого потока данных может служить поток со стороны ONU/T. Контроль осуществляется в паузах между всплесками потока данных. Данная методика контроля отличается от остальных методик контроля с использованием измерителя OTDR лишь используемой длиной волны, которая в данном случае равна длине волны информационного сигнала.



Рис 72. Контроль при помощи отдельного импульса OTDR

В случае использования контроля с использованием методики отдельного импульса в качестве источника импульса применяется лазерный диод в ONU/T.

Процесс измерения и анализа принятого из волокна сигнала контролируется электроникой, также обеспечивающей синхронизацию измерения OTDR и протокола данных.

Вторая методика называется методикой перемещения синусоидального сигнала с изменяемой частотой (sweep sine wave technique), при которой амплитуда сигнала данных модулируется синусоидальным сигналом (см. Рис 73). Если амплитуда информационного сигнала изменяется не более, чем на 5% от его полной амплитуды, это не приводит к появлению ошибок. Данная технология применяется при наличии непрерывного потока данных. Необходимая для контроля информация получается из частотной характеристики вернувшегося сигнала.

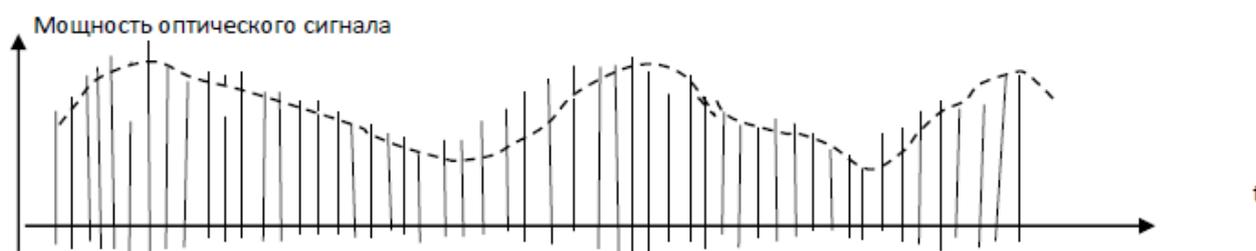


Рис. 73. Контроль при помощи модулированного сигнала

Методика передачи синусоидального сигнала основана на измерениях в частотной области. При этом используется оптический рефлектометр в частотном пространстве. Переданный сигнал модулируется по амплитуде синусоидальным сигналом переменной частоты. В качестве источника модулирующего синусоидального сигнала используется генератор, дающий на выходе высокочастотный сигнал с линейным нарастанием частоты. Поскольку отражения измеряются с запаздыванием, то их модулирующая частота будет отставать на текущее значение частоты генератора. Разница между частотой генератора и частотой отражения находится с помощью устройства для смещения частот, выполняющего на входных сигналах математическую операцию умножения. Низкочастотный фильтр обеспечивает отсечение нежелательных продуктов умножения на выходе устройства смещения. После такой обработки выходной сигнал представляет собой сумму косинусных сигналов различных амплитуд и частот. При этом амплитуды точно соответствуют квадрату величины оптических отражений, а частоты линейно зависят от задержек отдельных отражений. Сигнал переводится из частотного пространства во временное, где измеряется время и амплитуда отдельных отражений с помощью быстрого преобразования Фурье (Fast Fourier Transformation – FFT).

В модифицированные для этого вида контроля модули OLT и ONU/T следует добавить поддержку этого принципа работы.

8.2.5. Контроль при помощи рефлектометрии в волновом пространстве

Эффективность описанных выше механизмов контроля, основанных на применении OTDR, обеспечивается возможностью разделения отдельных отражений тестовых сигналов во временном пространстве. Ввиду сильного затухания, возникающего в сплиттере, выделение слабых отражений часто оказывается невозможным на практике. Кроме того, в сильно разветвленной пассивной оптической сети с большим числом абонентов процедура разделения отдельных сигналов нетривиальна, что еще больше усложняет задачу контроля таких сетей. Одним из возможных решений является контроль с помощью сигнала в волновом пространстве.

В системах контроля, в которых можно идентифицировать отдельный путь сигнала по длине волны тестового сигнала в отдельном соединении, основной измерительной аппаратурой является спектроанализатор (Optical Spectrum Analyser – OSA) и кодер длины волны (Wavelength Coded Tag – WCT). На Рис 74 показан контроль с помощью оптической рефлектометрии в волновом пространстве (Optical Wavelength Domain Reflectometry – OWDR).

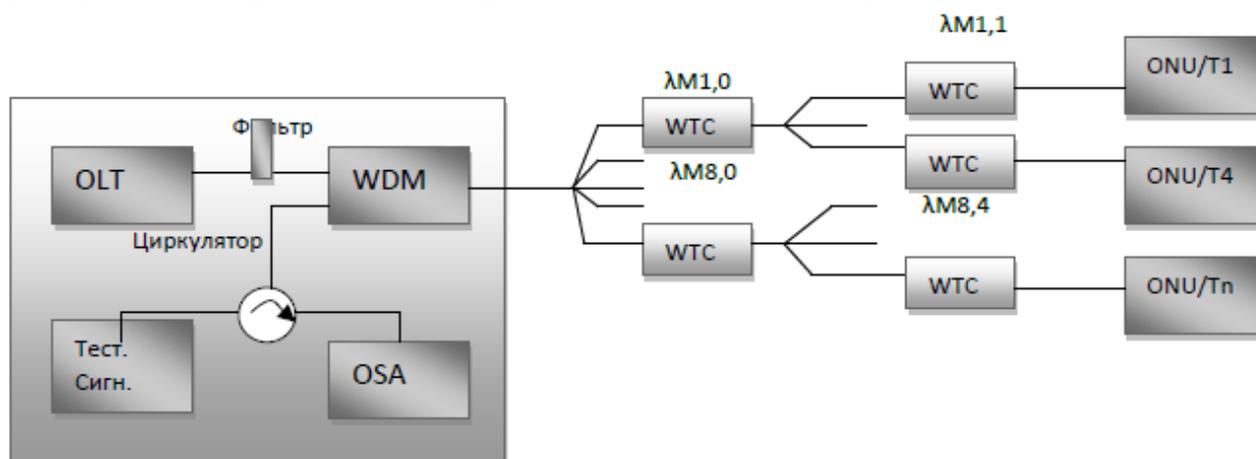


Рис. 74. Контроль при помощи OWDR

Каждому абоненту назначается уникальный код длины волны, выбираемый используемым WCT внутри ONU/T. Модули WCT могут размещаться и в других местах сети, при этом сеть разделяется на несколько секторов. Каждый модуль WCT должен соответствовать следующим условиям:

- волновая характеристика каждого модуля должна быть уникальной и распознаваемой на удаленном OSA;
- модуль должен быть прозрачным для прохождения сигналов всего трафика в сети;
- модуль не должен ослаблять сигнал и влиять на длину волны сигнала.

Для контроля с помощью системы OWDR кроме WCT необходим также дополнительный модуль WDM, работающий как мультиплексор. Мультиплексор в направлении восходящего потока данных объединяет полосы пропускания тестового сигнала и сигнала с данными, а в обратном направлении работает как демультиплексор.

В качестве источника тестового сигнала можно использовать любой широкополосный источник света, дающий свет в диапазоне длин волн от 1260 нм до 1625 нм. Каждый WCT отражает только один узкополосный сигнал WDM. Эти сигналы отдалены друг от друга примерно на 50 ГГц и находятся в полосе пропускания, посланной со стороны источника света. WCT должен пропускать все остальные длины волн, при этом потери должны быть минимальными. Таким образом, с помощью тестовых сигналов и анализа их «эха» можно контролировать каждую ветвь в сети доступа. В случае отсутствия «эха» от отдельного импульса делается вывод, что на данном участке оптоволокну произошел разрыв соединения. На следующем шаге с помощью OTDR можно определить точное место разрыва.

Для успешного функционирования механизма контроля с помощью OWDR необходимо задать полную доступную мощность оптического сигнала. В системах контроля, основанных на анализе отражений, необходимо помнить, что тестовый сигнал проходит двойной путь и поэтому ослабляется в два раза сильнее, чем сигнал с данными.

8.2.6. Контроль при помощи протокола управления

Передача данных между модулями OLT и ONU/T основана на разделении по времени. В случае EPON разделение по времени обеспечивается проколом управления множеством узлов (MultiPoint Control Protocol – MPCP).

MPCP управляет потоком данных в EPON путем отправки сообщений. Поскольку из-за топологии пассивной оптической сети ONU/T не могут связываться непосредственно друг с другом, MPCP размещается в OLT, откуда выделяет каналные интервалы каждому ONU/T. В соответствии с протоколом 802.3ah, задаваемым EPON, связь между модулями осуществляется с помощью сообщений “GATE” и “REPORT”. OLT посылает сообщение “GATE” каждому ONU/T с целью выделить каналный интервал для передачи данных. Канальный интервал задается парой “start time” и “length”. Эти два значения определяют, когда ONU/T может начать передачу и сколько времени она может продолжаться. Сообщение “REPORT” используется для обратной связи. С его помощью ONU/T передает информацию о своем состоянии в OLT (например, нехватку памяти). Процедура выполняется циклически, поскольку согласно протоколу каждый ONU/T должен перед началом передачи получить разрешение со стороны OLT. Для обеспечения синхронизации ONU/T должен послать в ответ на каждое принятое сообщение “GATE” сообщение “REPORT”.

Это правило можно использовать для контроля оптической сети. Поскольку ONU/T должен отправить ответное сообщение независимо от своего состояния (наличия данных для передачи), можно сделать вывод, что в случае неполучения “REPORT” на стороне OLT, ONU/T не получил сообщение “GATE”. Это указывает на возникновение ошибки в сети доступа или в ONU/T. Поскольку все сообщения имеют уникальные адреса, можно

определить проблемный путь, в котором с помощью измерителя OTDR определить место возникновения ошибки.

Данный способ контроля работает лишь в случае непрерывной работы ONU/T. При отключении ONU/T происходит ложное срабатывание системы.

9. Защитное переключение

По мере все более частого использования пассивных оптических сетей для бизнес-абонентов возрастает актуальность задачи защиты сети с помощью дублирования соединений и защитного переключения. Защитное переключение между резервными соединениями позволяет обеспечить непрерывное функционирование сети в случае ее повреждения, например, разрыва волокна.

Автоматическое защитное переключение – это функция сети, реализуемая на физическом уровне. Она позволяет перенаправить все сигналы, в том числе данные и сигнализацию с одного физического пути на другой. Эта функция хорошо известна еще со времени магистральных сетей SDH (G.783.2) с топологией кольца, в которых в случае разрыва кольца трафик перенаправляется в противоположном направлении. Защитное переключение не входит в стандарт EPON, но является частью GPON, поскольку упоминается в G.984.1. Стандарт говорит о возможности реализации защитного переключения в GPON с дублированием конфигурации. Несмотря на то, что защитное переключение не предусмотрено в стандарте EPON, конфигурации из стандарта GPON в нем также используются.

По аналогии с системами SDH используется два варианта защитного переключения: автоматическое и ручное. Автоматическое переключение выполняется при возникновении ошибок, например, потери сигнала, потери пакетов, снижения пропускной способности соединения, выражающегося в ухудшении BER, и других изменениях контролируемых параметров. Ручное переключение производит оператор сети в случае перенаправления, замены волокна и т. п. Хотя защитное переключение является необязательной функцией, должны быть обеспечены оба варианта переключения.

При переключении необходимо сохранить передаваемые данные и информацию о состоянии переключения. С этой целью защита является частью функциональности, называемой OAM (Operation, Administration and Maintenance), а не является частью процесса внутри обычного потока данных. То есть механизм переключения реализован как функция OAM, для которой должно быть зарезервировано место в заголовке пакета.

На Рис 75 показана модель дублирования сети доступа. В общем случае защита GPON должна обеспечиваться от интерфейса (Line Terminal – LT) ODN в OLT до интерфейса (Network Terminal –NT) ODN в ONU. Переключение из одной сети на другую обычно происходит за несколько мс. Максимально разрешенное время для восстановления соединения составляет 120 мс. В случае более долговременной потери данных услуга, основанная на POTS или ISDN, будет прервана, и ее необходимо будет инициировать заново.

Существует несколько способов реализовать дублирование в GPON. При этом протокол контроля для каждой конфигурации должен быть реализован независимо. Дублирование используется для той части сети, которая наиболее подвержена повреждениям. Это могут быть подключения OLT, подключения ONU, вся оптическая распределительная сеть или только общее волокно до

первого сплиттера. В случае переключения перед LT и/или переключения за NT оно выполняется электронным образом, в остальных случаях для осуществления переключения необходим оптический коммутатор.

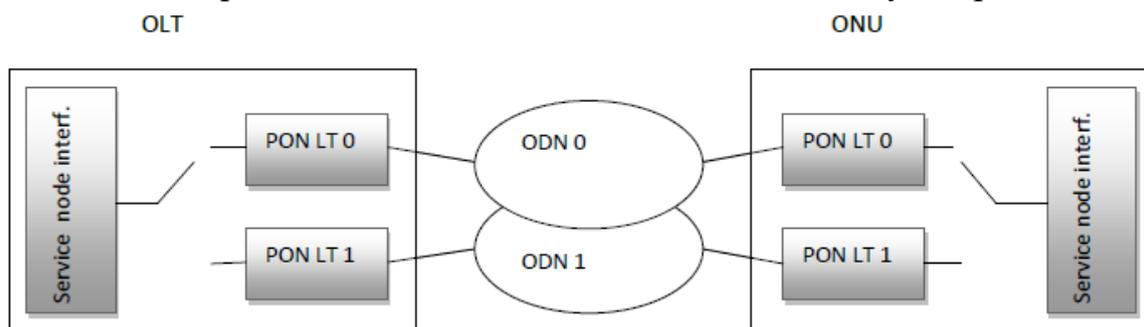


Рис. 75. Дублирование GPON с защитным переключением

В случае дублирования общего волокна (см. Рис. 76) протокол переключения в OLT/ONU не требуется, поскольку производится замена только оптического кабеля. Недостаток такой защиты заключается в необходимости применения оптических коммутаторов. Один из них можно заменить более простым сплиттером 1:2. С целью сохранения пассивности цепи имеет смысл заменить второй коммутатор также сплиттером 1:2. Из-за нежелательных возвратных отражений в дублированной ветви необходимо использовать соответствующие оптические коммутаторы, обеспечивающие минимум отражений. Коммутатор приносит в соединение дополнительное затухание, что снижает баланс мощности. В случае использования сплиттера 2:1 вносится дополнительное затухание 3 дБ. Потеря сигнала в момент переключения и различие в путях двух географически разделенных сетей приводят к потере одного или нескольких пакетов. Оптоэлектронные интерфейсы в OLT и ONU в данном случае не дублируются. Если по какой-либо причине происходит отказ интерфейса в OLT, нарушается работа всей сети.

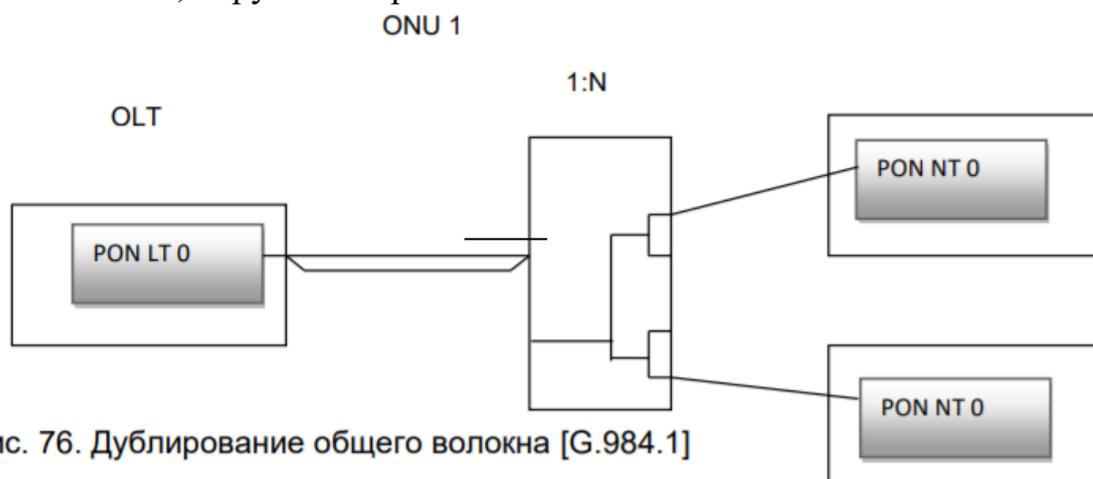


Рис. 76. Дублирование общего волокна [G.984.1]

Для исключения необходимости применения оптической коммутации можно обеспечить дублирование оптоэлектронного интерфейса в OLT (Рис.77). В этом случае протокол переключения также не требуется, поскольку переключение осуществляется лишь в OLT. В данной конфигурации резервный оптоэлектронный интерфейс находится в постоянной готовности к

переключению на него трафика. Оба выхода OLT через географически разделенные оптические волокна соединяются со входом оптического сплиттера. Оптический сплиттер должен иметь два подключения на стороне OLT. В данном примере из-за дополнительного сплиттера 2:2 в сигнал также вносится дополнительное затухание 3 дБ. Поскольку резервирование ONU в этой конфигурации не выполняется, то возможно обновление лишь со стороны OLT. И хотя в резервном OLT применяется временная задержка для компенсации различных расстояний, при переключении неизбежна потеря сигнала и, как следствие, передаваемых пакетов.

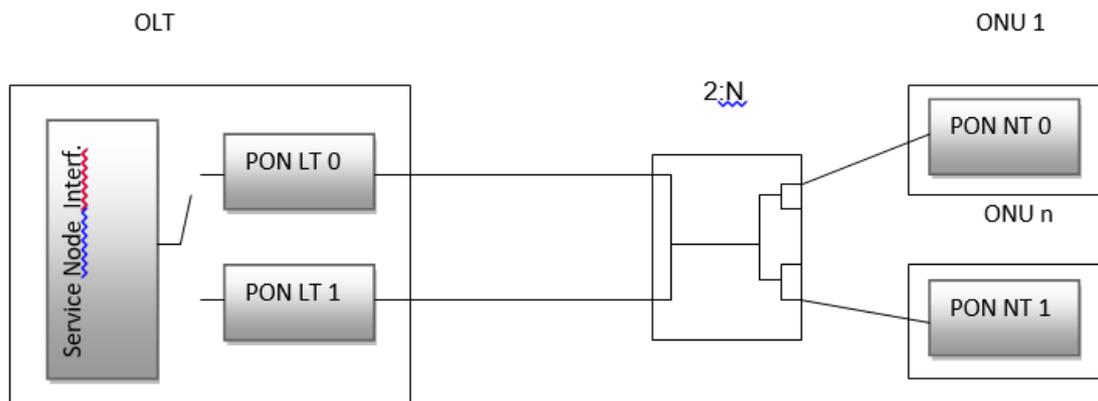


Рис 77. Дублирование общего волокна в OLT [G.984.1]

Резервный оптоэлектронный интерфейс в OLT можно использовать для нескольких пассивных оптических сетей (см. Рис 78). В конфигурацию добавлен оптический коммутатор, стоимость которого также распределяется между несколькими пассивными оптическими сетями.

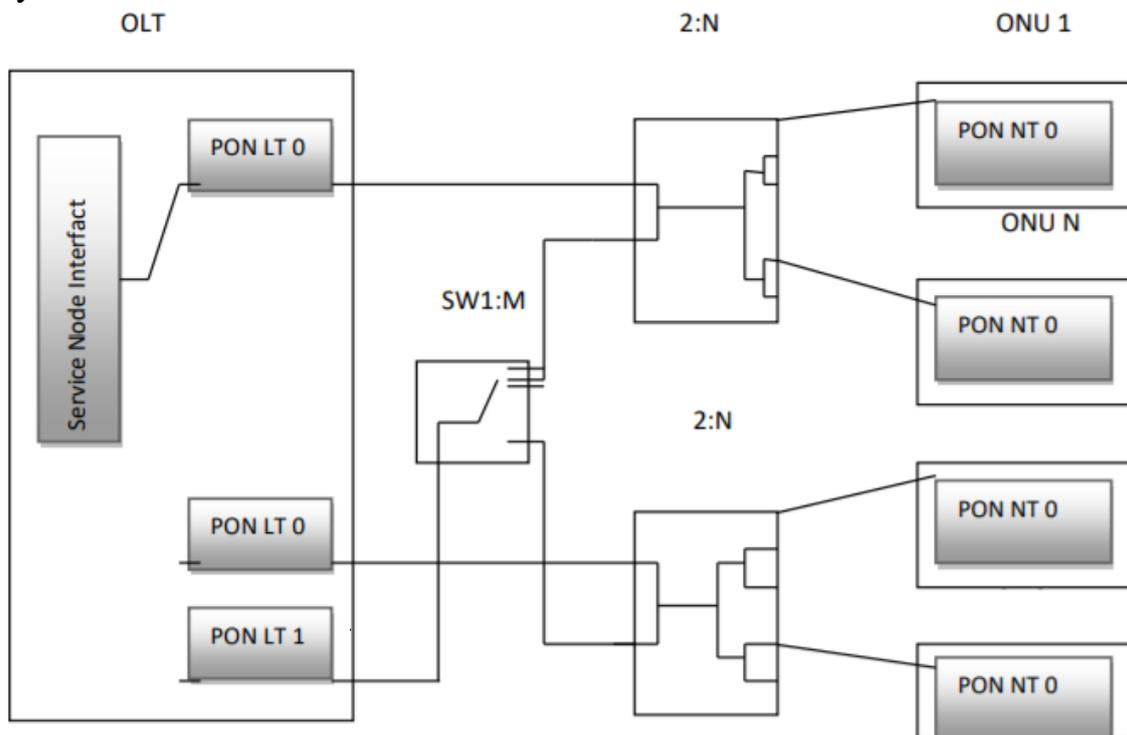


Рис 78. Резервный интерфейс OLT, разделяемый между несколькими PON

Иногда применяется защита оптической распределительной сети от сплиттера до ONU (см. Рис. 79). В этом случае необходимо дублирование всех коммуникаций до абонента по различным путям. Поскольку сплиттер имеет в два раза больше выходов, это снижает максимально возможную протяженность сети.

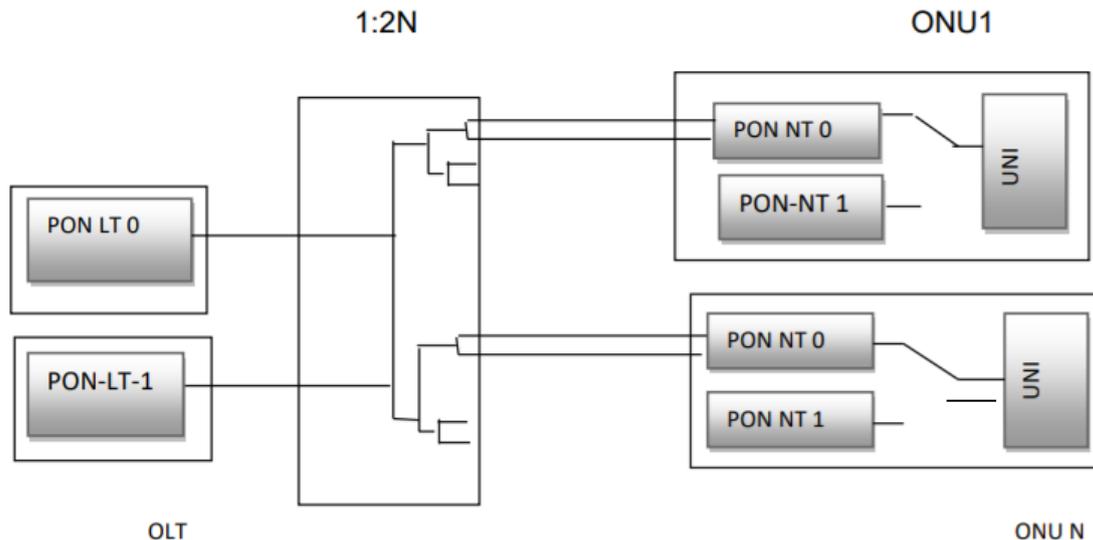


Рис 79. Дублирование волокна от сплиттера до ONU

Если необходимо исключить возможность потери сигнала или пакетов, следует использовать так называемое переключение “hitless”, конфигурация которого показана на Рис 80. В данном случае обеспечивается полное дублирование всей оптической разветвленной сети, включая оптоэлектронные интерфейсы в OLT и ONU. Переключение на обеих сторонах выполняется электрически между двумя работающими оптическими сетями, уже синхронизированными и передающими одинаковые данные. Разрыв волокна в любом месте сети (включая территорию абонента) вызывает переключение на резервную сеть. Различия оптических расстояний уже приняты во внимание при функционировании главной и резервной сетей. Данное решение резервирования является самым дорогим и обеспечивает наивысшую надежность, хотя реконфигурация возможна при появлении только одной ошибки.

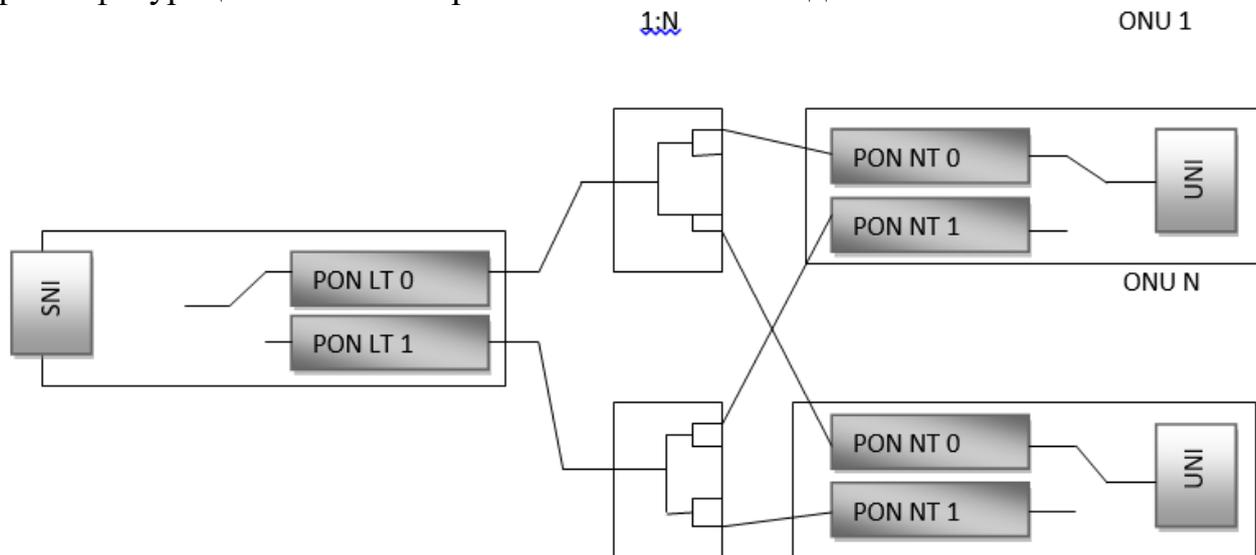


Рис 80. Полное дублирование PON [G.984.1]

В случае, когда ONU размещаются в помещениях абонентов, дублирование коммуникаций на своей территории производится на усмотрение абонента. Он сам определяет необходимость защитного переключения. Таким образом, часть абонентов хочет иметь резервирование, а другой части абонентов оно не требуется (или же они не готовы за него платить). На этом предположении основана конфигурация, в которой на стороне ONU дублируется только часть сети. Такая возможность показана на Рис 81. Используются два сплиттера 2:N, связывающие абонентов с основным и резервным соединениями. Поскольку у некоторых абонентов отсутствует резервирование коммуникаций, необходимо подать на оба сплиттера 2:N оба сигнала OLT, что обеспечивается с помощью двух сплиттеров 1:2 и перекрестного соединения. Как входящие, так и исходящие сигналы в этой конфигурации подвержены дополнительному затуханию 3 дБ.

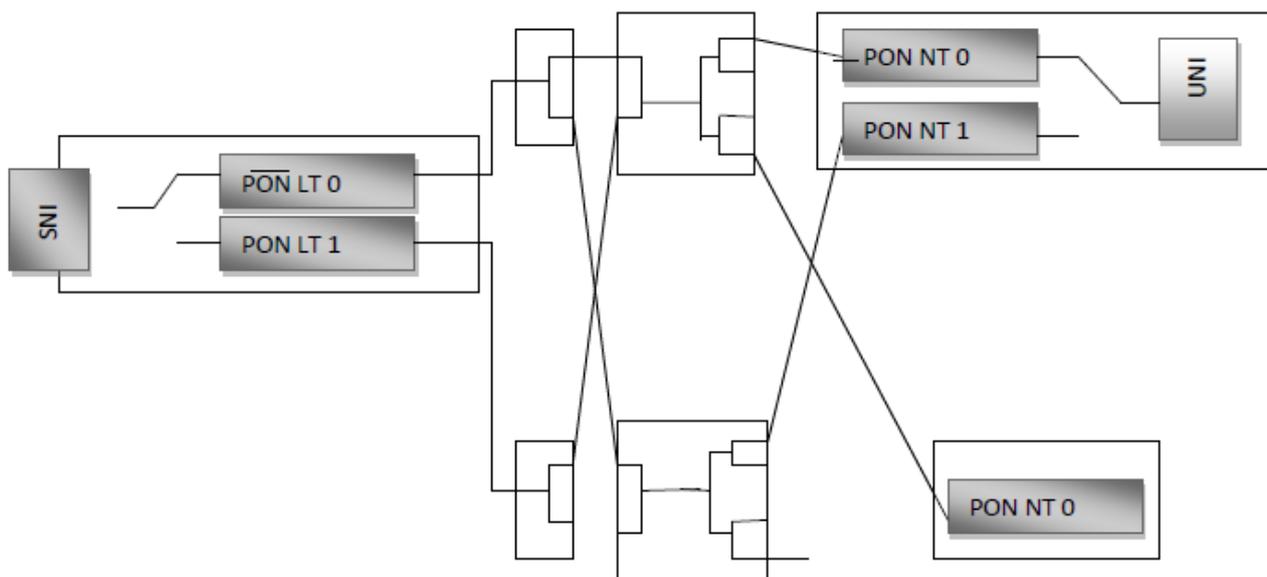


Рис 81. Частичное резервирование PON на стороне ONU [G.984.1]

В случае, если коммуникации дублируются у всех абонентов (см. Рис 82) такая конфигурация может быть устойчива к появлению двух ошибок, одной на участке в помещении абонента и второй на участке между OLT и точкой разделения. Конечно же, для такой реализации требуется наибольшее количество резервного оборудования и коммуникаций, что часто является неприемлемым для оператора из-за цены и сопровождения.

Во всех приведенных конфигурациях дублирование соединения и инфраструктура не используются до момента возникновения ошибок. В случае возникновения ошибок резервная инфраструктура используется лишь до момента их устранения. С этой точки зрения построение таких систем неэкономично. В конфигурации на Рис. 83 резервная инфраструктура используется и в случае отсутствия ошибок в сети. За счет этого достигается снижение расходов, но не снижается защищенность сети в случае появления ошибок в оптической сети и в одном или нескольких OLT. При возникновении ошибки защита обеспечивается лишь с перераспределением ресурсов в виде

временных интервалов. В данной конфигурации защитный оптический коммутатор M:2M используется на объекте OLT. При отказе одного из OLT выбирается наименее загруженный OLT из оставшихся и используется обоими деревьями PON. Таким образом, один OLT обеспечивает трафик для 2N ONU.

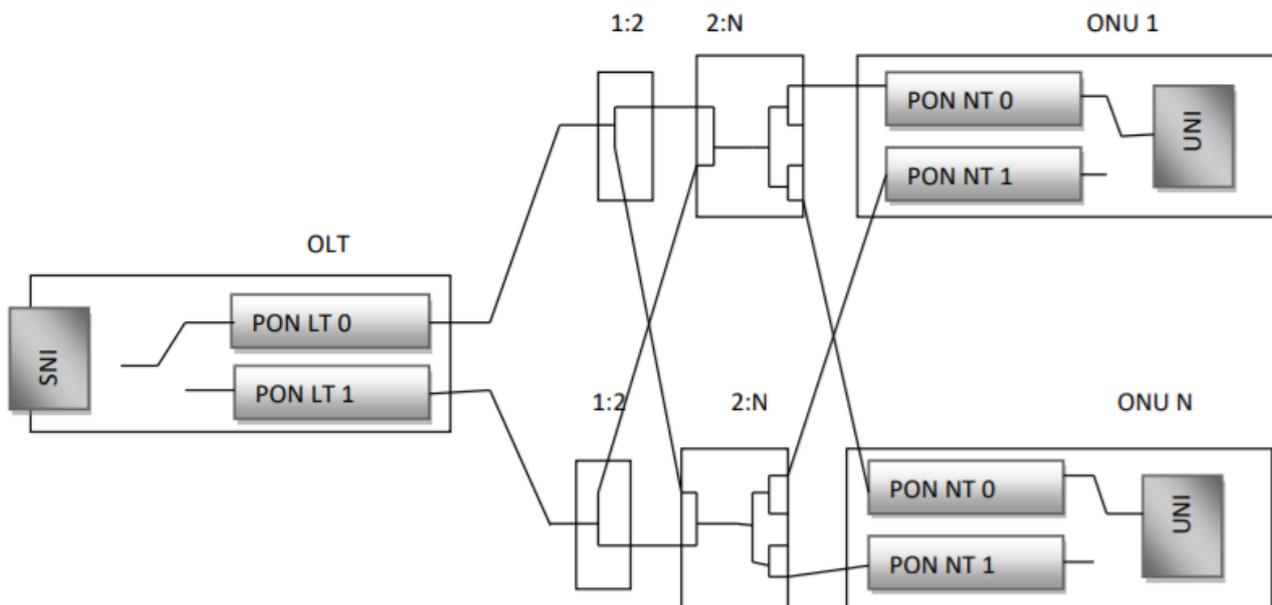


Рис 82. Полное дублирование PON с восстановлением после двух ошибок

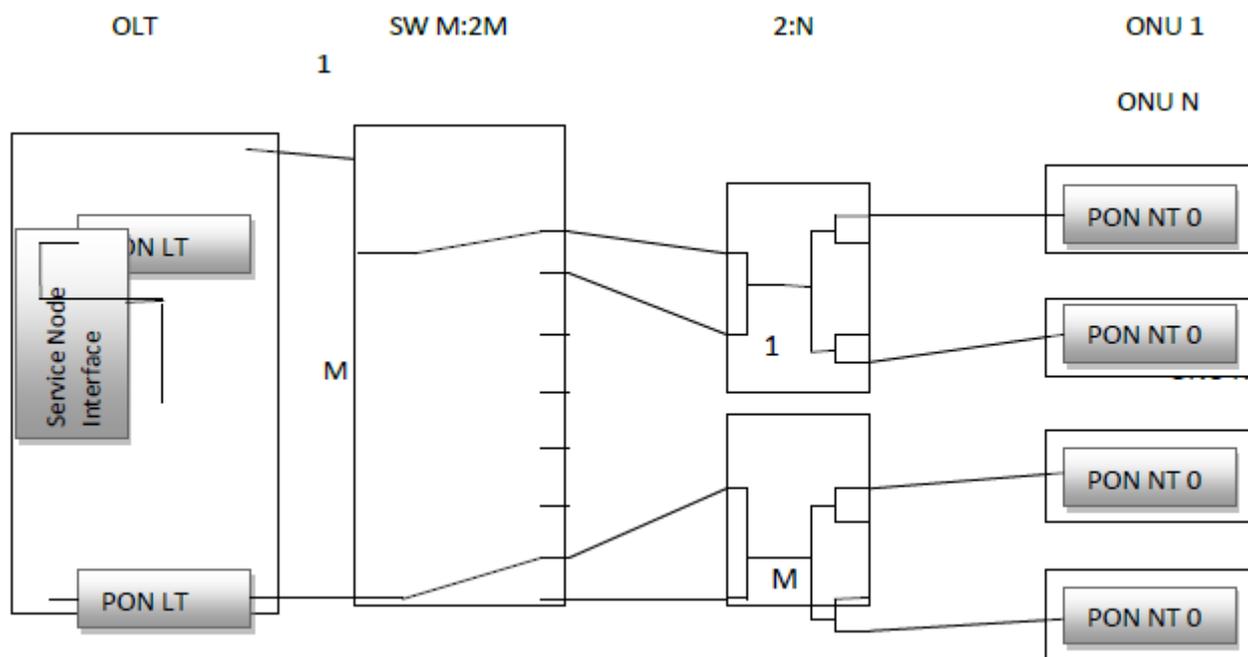


Рис 83. Наименее загруженный интерфейс OLT разделяется на два PON

Контрольные вопросы:

1. По разделу 1.

- типовые топологии оптической сети.

2. По разделу 2.

- развитие стандартизации оптической сети и ее установившиеся стандарты GPON и EPON.

3. По разделу 3.

- типы оптических волокон,

- искажения сигнала при распространении света по волокну

- пассивные оптические компоненты (оптические соединители и оптический сплиттер),

4. По разделу 4.

- оптоэлектронные компоненты PON (передающие и приемные оптоэлектронные модули, их типы и основные технические параметры.

- чувствительность цифрового приемника.

- оптические усилители (типы усилителей, принцип работы DFA и их основные параметры.

5. По разделу 5.

- планирование физического уровня и баланс мощности.

- передача видеосигнала.

- основы функционирования GPON на физическом уровне (разделение во времени в нисходящем и исходящем направлении, обеспечение безопасности, линейное кодирование, регистрация пользователей и определение расстояний, выравнивание задержек).

- основы функционирования GPON на верхних уровнях (стек протоколов, качество обслуживания, инкапсуляция данных, динамическое распределение спектра).

6. По разделу 6.

- особенности энергетического баланса в последовательной цепочке сетевых терминалов (сравнение для случаев GPON и CWDM).

7. По разделу 7.

- оптические измерительные инструменты (измеритель мощности, оптический рефлектометр во временной и частотной области).

- измерения на этапе построения сети.

8. По разделу 8.

- техническое обслуживание PON,

- контроль PON (контроль при помощи ожидаемых отражений, на основе выбора соединения, с разделением по длине волны, с использованием рефлектометра в том числе в волновом пространстве и при помощи протокола управления).

9. По разделу 9.

- дублирование GPON с защитным переключением (дублирование общего волокна, резервный интерфейс, дублирование волокна от сплиттера, частичное резервирование и полное дублирование).

Литература

1. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. М. Эко-трендз. 1998
2. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. М. Радио и связь. 2000
3. Власов И.И., Птичников М. М. Измерения в цифровых сетях связи. М. Постмаркет, 2005
4. Скляр Б. Цифровая связь. Вильямс. М-СПБ-Киев. 2003
5. Дансмор Б., Скандьер Т. Справочник по телекоммуникационным технологиям. Вильямс. М-СПБ-Киев. 2004
6. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. М. Мир. 2003
7. Крухмалев В.В., Гордиенко В. Н., Моченов А. Д. Цифровые системы передачи. Учебное пособие для ВУЗов. М. Горячая линия-Телеком. 2007
8. Алексеев Е.Б., Гордиенко В.Н., Крухмалев В.В., Моченов А.Д., Тверецкий М.С. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для ВУЗов. М. Горячая линия-Телеком. 2008
9. Бакланов И.Г. SDH-NGSDH практический взгляд на развитие транспортных сетей. М. Метротек. 2006
10. Зингеренко Ю.А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иерархии. Учебное пособие. СПб. НИУИТМО. 2013
11. Основы GPON. [HTTPS://XAKINGFO.RU](https://xakingfo.ru). 2017
12. Batagelj Bostjan. Passivna optičkaja set dostupa xPON. Narodna in univerzitetna Ljubljana. 2012
13. Петренко И.И., Убайдуллаев Р.Р. Пассивные оптические сети PON. Архитектура и стандарты. Lightwave. Russian Edition. №1, 2004
14. ITU-T G.983.1, Study Group 15. Broadband Optical Access Systems based on Passive Optical Networks (PON), Oct. 1998
15. ITU-T G.983.3, Study Group 15. A Broadband Optical Access System with increased Service Capability by Wavelength Allocation. March 2001
16. ITU-T G.984.3, Study Group 15. Gigabit-Capable Passive Optical Network (GPON). Transmission Convergence Layer Specification. Geneva, Oct. 2003

Зингеренко Юрий Александрович

Пассивные оптические сети xPON

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав РИО

Н.Ф.Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе