

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

© 2016 г. В.Ш. БЕРИКАШВИЛИ, В.И. НЕФЕДОВ, Д.Р. БАРСКИЙ,
А.Н. ДЕМЕНТЬЕВ, А.В. ОГАНЯН, К.А. СЕЛЕНЯ

Московский технологический университет (МИРЭА)

Введение

Современные радиосистемы передачи информации (спутниковые и радиорелейные) имеют скорость около $10 \text{ Гбит/с} = 10 \cdot 10^9 \text{ бит/с}$ на один частотный канал, причем последние 3 порядка достигнуты за последние 10 лет. Примерно на пять порядков возросла скорость передачи информации волоконно-оптических систем связи за последние 20 лет, достигнув примерно $2 \text{ Тбит/с} (2 \cdot 10^{12} \text{ бит/с})$ на одно волокно [1,2,8]. Волоконно-оптические системы позволяют передавать информацию со скоростью до 40 Гбит/с , а в перспективе до 100 Гбит/с по одному оптическому информационному каналу. Резкое увеличение скорости передачи информации произошло благодаря использованию новой технологии спектрального мультиплексирования и временного уплотнения каналов. Для его эффективного использования, необходимо иметь возможность в течение долгого времени увеличивать пропускную способность телекоммуникационных сетей и менять набор предоставляемых услуг без замены оптического кабеля.

В работе рассмотрены особенности организации современных высокоскоростных волоконно-оптических телекоммуникационных систем со скоростью передачи цифровой информации до 15 Тбит/с на основе спектрального уплотнения до 100 каналов в одном оптическом волокне. Конечные терминалы таких систем включают транспондеры временного уплотнения цифровых сигналов низкоскоростных систем со скоростью 62 кБит/с в поток данных со скоростью 40 Гбит/с . Предлагается использовать в составе трассового оборудования квантовые оптические усилители, оптические спектральные мультиплексоры/демультиплексоры, устройства ввода/вывода и переключатели каналов на основе оптических кольцевых микрорезонаторов.

1. Спектральное уплотнение каналов

Технология спектрального уплотнения с разделением по длинам волн (WDM) является основополагающей для использования широкой полосы пропускания оптического волокна [3-5]. Применение данной технологии позволяет одновременно на разных длинах волн передавать по одному волокну самые разные информационные потоки (аналоговые, ВЧ, СВЧ и цифровые). До того как были разработаны оптические усилители, передача информации была возможна лишь на короткие расстояния (до нескольких десятков км).

Одновременно с развитием технологии спектрального уплотнения решалась задача увеличения дальности передаваемой информации, как за счет снижения потерь в волокне, так и путем использования квантовых усилителей-ретрансляторов. Совершенствование существующих электронно-оптических усилителей достигло создания квантовых оптических усилителей на основе активного оптического волокна, легированного эрбием с накачкой излучения полупроводниковым лазером. Появление таких усилителей с Брэгговскими решетками позволило сделать их широкополосными и усиливать сигнал во всем диапазоне длин волн, на которых работают устройства спектрального уплотнения. Такие усилители могут быть установлены как ретрансляторы, а

также, на выходе передающего модуля или входе приемного модуля.

Возможности современных одномодовых волокон позволяют передавать огромное количество информации по одному волокну. Поэтому современные волоконно-оптические линии связи многоканальны, причем в одном волокне можно разместить до 100 физических каналов передачи на различных длинах волн скоростью передачи до 40 Гбит/с. Спектральное уплотнение каналов (англ. *Wavelength division multiplexing*, WDM, буквально мультиплексирование с разделением по длинам волн) – технология, позволяющая одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптическому волокну на разных несущих частотах. Технология WDM позволяет существенно увеличить пропускную способность канала (к 2010 году достигнута скорость 10,72 Тбит/с, а к 2015 — порядка 15,5 Тбит/с), причем с такой скоростью можно использовать уже проложенные волоконно-оптические линии связи. Благодаря WDM удается организовать двустороннюю многоканальную передачу трафика десятков высокоскоростных информационных каналов по одному волокну. Структурная схема волоконно-оптической системы передачи информации со спектральным уплотнением каналов представлена на рис. 1.

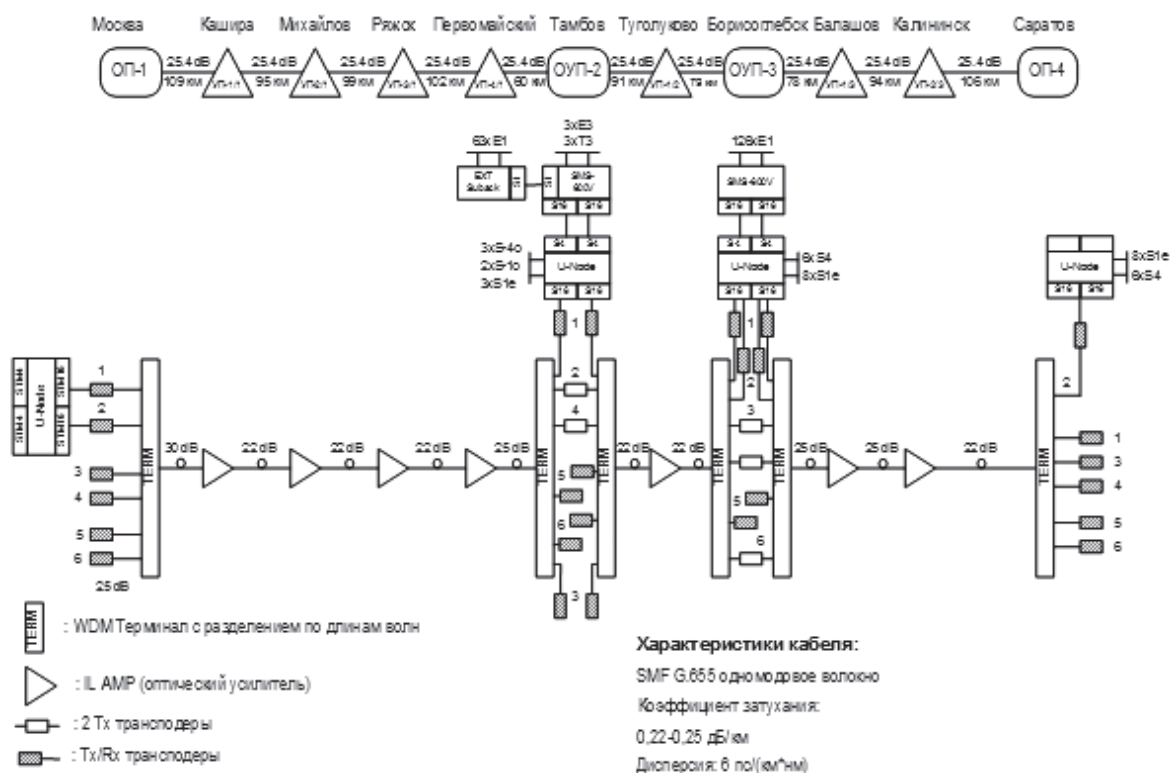


Рис. 1. Структурная схема волоконно-оптической системы передачи информации со спектральным уплотнением каналов.

Многоканальная система передачи информации включает следующие составные элементы (рис. 1): Tx/Rx – транспондеры ввода вывода с лазерами, модуляторами и фото детекторами, 2Tx – дуплексные транспондеры, ILAMP – квантовый оптический усилитель (КОУ), WDM терминалы, обеспечивающие мультиплексирование и разделение сигналов по длинам волн. В технологии WDM каждый лазерный передатчик генерирует сигнал на определенной частоте из частотного плана. Все эти сигналы объединяются мультиплексором (MUX) перед вводом в оптическое волокно. На приемном конце сигналы разделяются демультиплексором (DEMUX).

Каждый сигнал от источника информации и сигнал от соответствующего лазера с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ поступают в модулятор, где происходит модуляция оптического сигнала цифровым электрическим сигналом транспондера. Далее промодулированные сигналы попадают в мультиплексор, где происходит объединение оптических сигналов разных длин волн в одно одномодовое волокно. На выходе мультиплек-

сора спектрально уплотненные сигналы в одном волокне, готовые для передачи на необходимое расстояние. В связи с тем, что оптоволокно имеет определенный коэффициент затухания и имеются сварные стыки отрезков кабеля длиной около 5 км, через определенное расстояние 120...150 км необходимо ставить усилители оптических сигналов. Поскольку усилитель не восстанавливает форму сигнала, при передаче на расстояния более 1000 км необходимо дополнительно ставить регенераторы восстановления формы. На другом конце линии имеется оптический демультиплексор, который осуществляет разделение переданных сигналов по соответствующим приемникам или канальным волноводам.

Особенностью всех волоконно-оптических систем является их работа в дуплексном режиме, т.е. передача осуществляется как в прямом, так и в обратном направлении. Поэтому необходимо, чтобы все элементы схемы были обратимыми. Это относится как мультиплексорам и демультиплексорам, так и к оптическим усилителям на линии передачи данных.

В периодической литературе предлагаются различные конструкции терабитных систем связи на основе спектрального уплотнения каналов. Для локальных, корпоративных и внутриобъектовых сетей вполне достаточно *грубого* спектрального уплотнения до 16 уплотняемых каналов (*Coarse WDM* или *CWDM*). Однако там, где есть большие информационные потоки, целесообразно использовать большее количество каналов в «окне» минимальных потерь оптических волокон в диапазоне длин волн 1,45...1,6 мкм. В настоящее время системы с частотным интервалом между каналами 100 ГГц (~ 0,8 нм) и меньше называют системами *плотного* спектрального мультиплексирования (*DWDM – Dense WDM*). Именно такие системы используются для магистральной передачи информации (для межконтинентальных и межрегиональных линий связи), а также в системах с большими информационными потоками. Целесообразно использовать для вышеупомянутых целей и сверхплотного спектрального уплотнения (*UDWDM – Ultra Dense WDM*) с шагом деления 0,1...0,2 нм. Теоретически возможна передача в любом диапазоне длин волн 0,5...1,8 мкм, однако практические ограничения по затуханию оставляют для использования в системах спектрального мультиплексирования узкий диапазон в окрестности длин волн 1400 и 1600 нм. И этот диапазон предоставляет огромные возможности для передачи данных (до 200 каналов).

Сейчас уделяется особое внимание плотному спектральному мультиплексированию (*DWDM-системам*). Эти системы позволяют более эффективно использовать спектр. Чем уже промежутки, разделяющие спектральные каналы, тем больше информационных каналов можно передать в заданном диапазоне спектральных длин волн, и, следовательно, тем выше будет эффективность использования спектра и волоконной линии связи.

Технология спектрального мультиплексирования пока применяется, в основном, на линиях связи большой протяженности, где требуется большая полоса пропускания [3-5]. Сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения потенциально также являются широким рынком для применения технологии спектрального мультиплексирования. Эта технология перспективна и для прокладки оптических кабелей в каждый дом для создания качественных информационных каналов связи широкого назначения (ТВ, интернет, видеотелефон и т.п.).

Необходимость эффективного использования проложенного оптического кабеля привела к значительному увеличению числа каналов, передаваемых по одному волокну, и уменьшению спектральных интервалов между ними. Однако, при сближении каналов, особенно в протяженных *DWDM-системах* связи, начинают проявляться нелинейные эффекты и появление перекрестных помех между каналами, что, в конечном счете, приводит к снижению соотношения сигнал/шум и качества связи. Поэтому необходимо выбирать оптимальное число каналов.

2. Временное уплотнение каналов и синхронная цифровая иерархия (SDH)

В связи с тем, что скорости передачи информации 10 или 40 Гбит/с очень большие, в одном оптическом (физическом) канале (на одной оптической длине волны) можно поместить десятки или сотни тысяч медленных телефонных каналов. Для этого

применяется технология уплотнения каналов во времени, которая называется технологией синхронной цифровой иерархии (SDH) [1,9,10]. Здесь, так же как и в технологии WDM, мультиплексор и демультиплексор являются ключевыми элементами, только работают во временной области и реализуются электронными устройствами.

Технология и стандарты SDH. Синхронная цифровая иерархия (СЦИ; или SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*) — это технология транспортных телекоммуникационных сетей. Стандарты СЦИ определяют характеристики цифровых сигналов, включая структуру фреймов (циклов с набором цифровых кодов), метод мультиплексирования, иерархию цифровых скоростей, кодовые шаблоны интерфейсов и т.д. Стандартизация интерфейсов определяет возможность соединения различного оборудования от разных производителей. Система SDH обеспечивает универсальные стандарты для сетевых узловых интерфейсов, включая стандарты на уровне цифровых скоростей, структуру фрейма, метод мультиплексирования, линейные интерфейсы, мониторинг и управление. Поэтому SDH оборудование от разных производителей может легко соединяться и устанавливаться в одной линии или системе передачи информации, что наилучшим образом демонстрирует системную совместимость. Система SDH обеспечивает стандартные уровни информационных структур, то есть набор стандартных скоростей передачи. Базовый уровень скорости STM-1 – 155,52 Мбит/с. Цифровые скорости более высоких уровней определяются умножением скорости потока STM-1, соответственно, на 4, 16, 64 и т.д.: 622 Мбит/с (STM-4), 2,5 Гбит/с (STM-16), 10 Гбит/с (STM-64) и 40 Гбит/с (STM-256).

Линейные оптические интерфейсы. Линейные оптические интерфейсы работают на основе универсальных стандартов. Линейный сигнал дополнительно скремблируется (англ. *scrambled* – перемешанный, зашифрованный), т.е. перекодируется по специальным алгоритмам. Вставки избыточного кода нет.

Стандарт скремблирования – универсальный. Поэтому и на приеме, и на передаче должны использоваться стандартные скремблер и дескремблер. Цель скремблирования – сделать вероятность возникновения «1» бита и «0» бита близкой к 50 % для облегчения извлечения синхросигнала из линейного сигнала. Поскольку линейный сигнал только скремблируется, линейная скорость сигнала SDH соответствует стандартной скорости сигнала на электрическом интерфейсе SDH. Таким образом, потребление оптической мощности передающими лазерами остается неизменным, однако, снижается их тепловыделение (так как исключается возможность следования большого количества «1» подряд), что увеличивает их ресурс. Еще одной причиной, по которой используется скремблирование - длительная последовательность единиц «1» (или нулей «0») воспринимается автоматической обратной связью регулировки усиления (АРУ) как увеличение (уменьшение) уровня входного сигнала, что может привести к неправильной работе линии связи.

Временное мультиплексирование. Поскольку низкоскоростные сигналы SDH мультиплексируются в структуру фрейма высокоскоростных сигналов SDH посредством метода побайтового мультиплексирования, их расположение во фрейме высокоскоростного сигнала фиксировано и определено или, скажем, предсказуемо. Поэтому низкоскоростной сигнал SDH, например 155 Мбит/с (STM-1) может быть напрямую добавлен или выделен из высокоскоростного сигнала, например 2.5 Гбит/с (STM-16). Это упрощает процесс мультиплексирования и демультиплексирования сигнала и делает SDH иерархию особенно подходящей для высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи, обладающих большой производительностью (рис. 2).

Поскольку принят метод синхронного мультиплексирования и гибкого отображения структуры, низкоскоростные сигналы плезиохронной цифровой иерархии PDH (например, 2 Мбит/с) также могут быть мультиплексированы в сигнал SDH STM-N. Их расположение во фрейме STM-N также предсказуемо. Поэтому низкоскоростной tributивный сигнал (вплоть до сигнала DS-0, то есть одного таймслота PDH, 64 кбит/с, телефонный канал) может быть напрямую добавлен или извлечен из сигнала STM-N.

Заметим, что это не одно и то же с вышеописанным процессом добавления низкоскоростного сигнала SDH в высокоскоростной сигнал SDH или выделения низкоскоростного сигнала из высокоскоростного. Здесь это относится к прямому добавле-

нию/выделению низкоскоростных трибутивных сигналов, таких как, например, 2 Мбит/с, 34 Мбит/с и 140 Мбит/с в/из сигнала SDH. Это устраняет необходимость использования большого количества оборудования мультиплексирования-демультиплексирования (связанного), повышает надежность и уменьшает вероятность потери качества сигнала, снижает стоимость, потребление мощности и сложность оборудования. Добавление/выделение услуг в дальнейшем упрощается. Этот метод мультиплексирования помогает выполнять функцию цифровой кросскоммутиации (DXC) и обеспечивает сеть мощной функцией самовосстановления. Абонентов можно динамически соединять в соответствии с потребностями и выполнять отслеживание трафика в реальном времени.

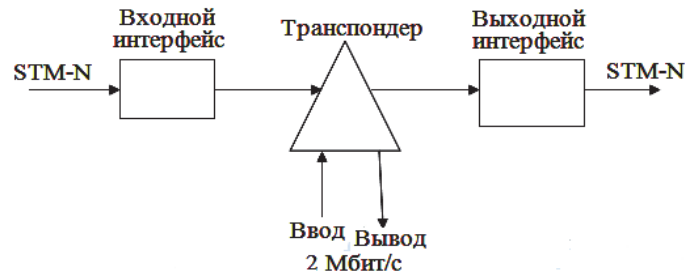


Рис. 2. Структурная схема формирования каналов в системах связи SDH.

Таким образом, современные ВОЛС работают одновременно в режиме спектрального уплотнения (WDM) и в режиме временного уплотнения (SDH).

3. Частотное уплотнение каналов на СВЧ несущей

Увеличить производительность волоконно-оптической линии связи по информационно-пропускной способности можно и другим способом. Для этого можно использовать передачу на сверх высокой частоте (СВЧ). На СВЧ-волне, легко выделяемой фотоприемником, можно разместить и выделять десятки и сотни высокочастотных (ВЧ) сигналов [2,10]. Такая система передачи информации принята в современных радиорелейных и спутниковых системах передачи информации. Особенно важно отметить, что в настоящее время существует и широко используется аппаратура для многоканальной связи в СВЧ диапазоне. Структурная схема многоканальной ВОЛС с частотным уплотнением каналов на СВЧ несущей приведена на рис. 3.

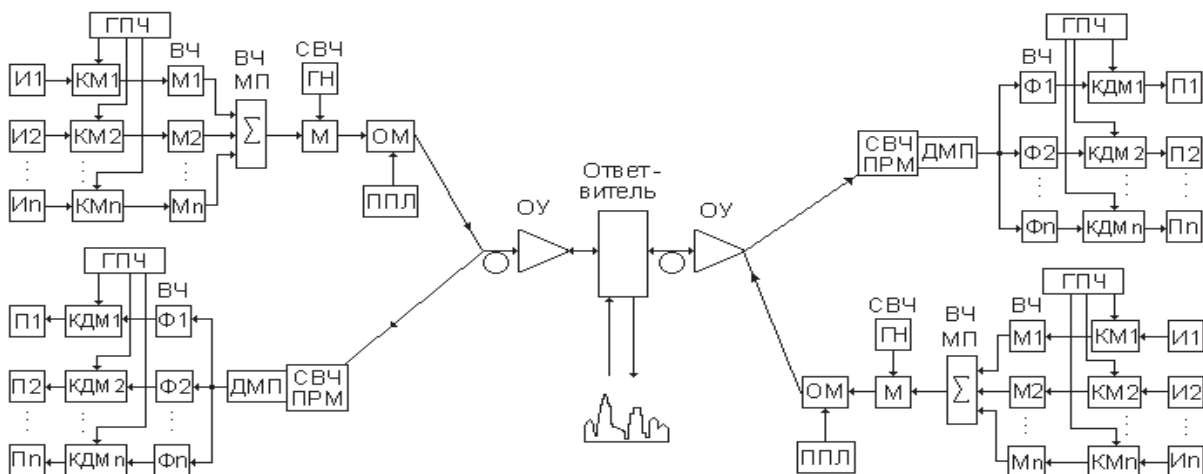


Рис. 3. Структурная схема многоканальной ВОЛС с частотным разделением каналов

Вверху слева находится передающая часть системы. Она включает следующие составные элементы (рис. 3): I_i – источники информации, ГПЧ – генераторы промежуточных частот, $КМ_i$ – каналные модуляторы, M_i – ВЧ модуляторы, ВЧ МП – ВЧ-мультиплексор, ГН СВЧ – генератор частоты СВЧ, М - модулятор частоты СВЧ, ПЛ –

полупроводниковый лазер, ОМ – оптический модулятор, ОУ – квантовые оптические усилители. Вверху в правой части схемы находится приемная часть аппаратуры. Она включает следующие составные элементы по обозначениям на рисунке: СВЧ ПРМ – СВЧ-приемник, включающий фотоприемник с СВЧ-услителем и фильтром; ДМП – демультиплексор на основе гетеродина и смесителя; ВЧ Φ_i – ВЧ-фильтры; КДМ_i – канальные демодуляторы, П_i – получатели информации.

Рассмотрим подробнее назначение каждого из устройств системы. Источники информации (И) – представляют информацию в виде электрических сигналов в аналоговой или цифровой форме.

Получатели информации (П) – принимают сигналы в электрической форме. У них могут быть дополнительные специальные устройства для усиления и преобразования их в удобную для восприятия форму (телефонная речь) или видео изображение. Канальный модулятор (КМ) – функциональный узел, осуществляющий изменение какого-либо параметра (амплитуды, фазы, частоты) сигнала промежуточной частоты, в соответствии с подаваемым на его вход информационным сигналом. Он производит модуляцию радиосигнала на одной из промежуточных частот канала. Канальный демодулятор (КДМ) – представляет собой преобразователь радиоимпульсной последовательности в видеоимпульсную последовательность или аналоговый сигнал. На выходе КДМ включается фильтр низкой частоты (ФНЧ) для выделения из радиосигнала низкочастотной составляющей сигнала передаваемой информации. Важной частью СВЧ-приемника (СВЧ ПРМ) является фотоприемник (ФП), обеспечивающий преобразование сигналов оптического излучения в электрические сигналы. Основными требованиями, предъявляемыми к фотоприемникам, являются: высокая чувствительность на рабочей длине волны, низкий уровень собственных шумов, стабильность параметров, высокая надежность и низкое напряжение питания. Перечисленным требованиям и хорошие частотные характеристики в наиболее полной мере удовлетворяют лавинные и *p-i-n* фотодиоды, которые, в основном, и применяются в сетевом оборудовании оптической связи.

После получения СВЧ сигнала с фотоприемника происходит его преобразование в набор ВЧ-сигналов на промежуточной частоте. Осуществляется это преобразование в нелинейном устройстве (смесителе) при наложении сигнала вспомогательного СВЧ-гетеродина в устройстве обозначенном как ДМП (демультиплексор). Отдельные сигналы выделяются с помощью фильтров Φ_i . Дальнейшее выделение низкоскоростных или низкочастотных сигналов (телефонных) осуществляют с помощью канальных демодуляторов КДМ. Полупроводниковый лазер (ППЛ) – генерирует близкое к монохроматическому излучение с шириной спектра 0,1...0,2 нм, работает на определенных длинах волн в диапазонах 1300 и 1550 нм. Он используется для передачи сигналов по одномодовому оптическому волокну. Быстродействие современных лазеров позволяет осуществлять прямую токовую модуляцию сигналами с частотами до 1 ГГц. Однако, более высокие частоты модуляции (до 10 и 20 ГГц) и скорости передачи информации осуществляют с помощью внешних электрооптических модуляторов. Типовая выходная мощность излучения современных лазеров, применяемых в ВОСП, составляет 3...5 мВт. Потери излучения при вводе в волокно обычно не превышают 2 дБ. Диаграмма направленности полупроводникового лазера имеет малую ширину, что при прочих равных условиях позволяет ввести в волокно большую мощность. Потери при вводе обычно не превышают 2 дБ. Одновременно полупроводниковый лазер имеет малую ширину спектральной характеристики, что имеет своим следствием снижение дисперсионных искажений передаваемого сигнала. Необходимо отметить, что система работает в дуплексном режиме. Поэтому на схеме рис. 3 в нижней части дано зеркальное отображение верхней системы для осуществления передачи информационных сигналов в обратном направлении.

Система с одним лазером, передатчиком и приемником работает на одной длине λ_1 . Естественно, что подобные системы с СВЧ-модуляцией могут работать на независимых длинах волн в CWDM-системах, рассмотренных в первом разделе. Применение оптических мультиплексоров позволяет многократно увеличить пропускную способность линии связи путем организации двунаправленной передачи по одному волокну.

ну на нескольких оптических длинах волн.

В настоящее время применяют системы с использованием 32-х и 64-х каналов в диапазоне длин волн 1,45...1,6 мкм с разделением по длинам волн через 1нм. Потенциально в этом диапазоне можно эффективно использовать до 150 оптических каналов с шагом 0,5 нм, а каждый из них модулирован СВЧ-сигналом 10 ГГц. В последнее время в закрытых каналах передачи информации успешно применяется многоуровневая передача сигналов на СВЧ несущей. Многоуровневая модуляция по амплитуде и фазе позволяет расширить «словарь» сигналов до 64 уровней (8 по амплитуде и 8 по фазе). Приемная аппаратура в этом случае должна иметь дискриминатор по уровням амплитуды, фазовый детектор и дискриминатор по уровням фазы. Применение такой технологии передачи позволяет повысить скорость передачи информации с 10 Гбит/с до 40 Гбит/с.

4. Аппаратура конечных терминалов

Для многоканальной телекоммуникационной системы (рис. 1), работающей на одной волоконной линии в режиме WDM или CWDM на скоростях передачи информации 10 или 40 Гбит/с, необходимо наличие 32-х или 64-х полупроводниковых лазеров, работающих по сетке частот, определенной Международной электротехнической комиссией (МЭК). На таких скоростях передачи требуются лазеры, работающие в непрерывном режиме генерации (*Continue Waive Laser*). Модуляция, как правило, осуществляется высокоскоростным интегрально-оптическим модулятором Маха-Цандера. Современное аппаратное решение заключается в использовании планарной технологии интегрально-оптического исполнения, включающего создание линейки полупроводниковых лазеров с селективными брэгговскими решетками в резонаторах модуляторами на канальных волноводах. Такая структура стыкуется с интегрально-оптическим мультиплексором на основе упорядоченной волноводной решетки (*AWG – arrayed waveguide grating*). В результате на одной плате формируется передающий модуль с 16-ю или 32мя высокочастотными разъемами для ввода информации и одним оптическим разъемом для подключения одного оптического волокна. Кроме того, на этой плате может быть несколько микросхем транспондеров для ввода медленных каналов в высокоскоростных и соответствующих выходных разъемов для *SDH*. Перед разъемом, как правило, приваривают вращатель Фарадея в качестве вентиля, предотвращающего обратные отражения, которые влияют на частотные характеристики и режим работы лазеров. Кроме того приваривают разветвитель для отвода обратного излучения, при двусторонней (дуплексной) передаче. Это излучение направляют к приемной плате с демультиплексором на *AWG* структуре с пристыкованной линейкой фотодиодов. Плата имеет входное волокно и 16 (или 32) высокочастотных разъема для подсоединения потребителей высокоскоростных каналов передачи информации. На плате может быть несколько микросхем транспондеров для выделения медленных каналов из высокоскоростных и соответствующих выходных разъемов для *SDH*.

На структурной схеме при дуплексной связи (рис. 4) показано направление информационных связей и потоков приема и передачи информации, т.е. схема является также функциональной.

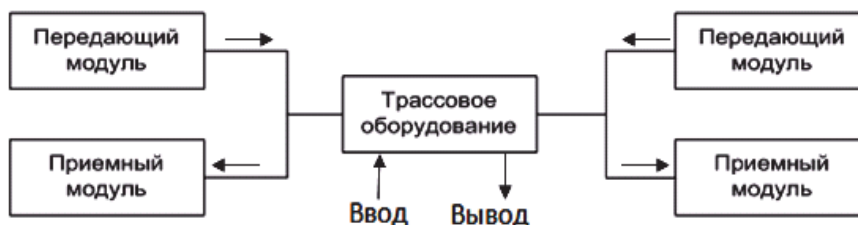


Рис. 4. Укрупненная структурная схема при дуплексной связи.

Приведенные в описании платы обеспечивают работу многих оптических каналов одного волокна, а в оптоволоконном кабеле может быть 8, 16, 24 или 32 волокна. Таким образом, для загрузки кабельной линии необходимо иметь кратное количество приемных и передающих плат, которые вставляются в шкафную стойку с оптическими

разъемами для подключения всех волокон кабеля. Аналогичная аппаратура должна быть на другом концевом терминале.

5. Трассовое оборудование

Для обеспечения линии большой протяженности необходимы оптические усилители, которые устанавливаются через 120...150 км. Сейчас предпочтение оказывают *квантовым оптическим усилителям*. Квантовые оптические усилители (КОУ) на основе кварц-германатного волокна, легированного эрбием, являются основой для построения экономически оправданных сетей со спектральным уплотнением каналов. Квантовые оптические усилители (*EDFA*) обеспечивают усиление всех каналов, независимо от протоколов или схемы модулирования сигналов, используемых каждым каналом. Усилители *EDFA* открывают возможность передачи модулированного оптического сигнала на очень большие расстояния без необходимости восстановления и регенерации передаваемой информации. Система в общем случае состоит из одного или нескольких лазерных передатчиков, мультиплексора, одного или нескольких усилителей *EDFA*, мультиплексоров ввода/вывода, оптического волокна (кабеля), демультиплексора и соответствующего числа фотоприемников, а также электронного оборудования, которое обрабатывает передаваемые данные в соответствии с используемыми протоколами связи системы сетевого управления. На промежуточных узлах в линии или сети связи некоторые оптические каналы могут быть добавлены или выделены из составного оптического сигнала посредством оптических мультиплексоров ввода/вывода (*OMBB*) / *OADM – Optical Add/Drop Multiplexer*/ или систем кросскоммутиации (*ОСКК*) / *ОССС – Optical Cross-Connect System*/ оптических каналов. Конструкции и принципы работы устройств для реализации этих функций решают на основе кольцевых резонаторных структур [6,7,9].

В заключение отметим, что в современных высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи цифровой информации успешно применяют спектрального и частотного уплотнения каналов и временно уплотнение цифровых сигналов, обеспечивая передачу до 15 Тбит/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. – М.: СОЛОН-Пресс, 2014. – 272 с.
2. Берикашвили Б.Ш., Шкундин С.З., Стебнев А.В. Волоконно-оптические каналы передачи информации. – М.: МГГУ, 2013, 198 с.
3. Берикашвили В.Ш., Яковлев М.Я. Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2005, № 2, с. 10.
4. Берикашвили В.Ш., Шилов И.П. Планарные волноводные структуры из кварцевого стекла, полученные в СВЧ-плазме пониженного давления. // Материалы II Межрегионального семинара «Нанотехнологии и фотонные кристаллы», Калуга-Москва, 2004.
5. Фритц Дж. Устройства DWDM для корпоративных сетей связи. // Сети, №6, 2001.
6. Xu Q.F., Schmidt B., Shaky J., and Lipson M. Cascaded silicon micro-ring modulators for WDM optical interconnections // Optics Express, 2006. No. 14(20). P.9430-9435.
7. Bortnik B., Hung Y.-C., Tazawa H. Fetterman. Electrooptic Polymer Ring Resonator Modulation up to 165 GHz // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2007, V. 13, No.1. P.104-110.
8. Bogaerts W. Compact Wavelength-Selective Functions in Silicon-on-Insulator Photonic Wires // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2006, V.12. № 6. P. 1394-1401.
9. Нефедов В.И., Сигов А.С. Теория связи: учебник для академического бакалавриата / Под ред. В.И. Нефедова. – М.: Юрайт, 2016. – 495 с.
10. Берикашвили Б.Ш., Шкундин С.З. Теория информационных процессов и систем. – М.: Изд. Горная книга, 2012. – 474 с.