



# ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ DWDM



## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ DWDM

Брошюра представляет собой введение в технологию плотного спектрального уплотнения DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Предназначена как для специалистов, кто уже знаком с технологиями DWDM-систем, так и для тех, кто только начинает в них разбираться.

Материал подготовлен специалистами компании Т8.



Расширенный онлайн-проект  
«Основы технологии DWDM»  
на сайте [e-learning.t8.ru](https://e-learning.t8.ru)

## СОДЕРЖАНИЕ

- 5 Введение в технологию DWDM
- 6 Основные компоненты DWDM-системы
- 11 Причины возникновения ошибок в системах DWDM при приеме оптического сигнала
- 12 Методы увеличения производительности DWDM-системы
- 19 Гибкость и масштабируемость современных оптических транспортных систем



MS-1200E

C1

C2

C3

C4

C5

C6

## Введение в технологию DWDM

С термином «DWDM» сегодня связан обширный круг технологий, решений и стандартов в области связи и передачи данных.

**DWDM – технология плотного спектрально-го мультиплексирования. Оптические каналы располагаются в диапазоне от 1530 до 1565 нм с шагом 0.4 нм (50 ГГц) или 0.8 нм (100 ГГц). Современные решения также допускают перестраиваемый шаг с улучшенной гранулярностью. Использование большого числа несущих с минимальным шагом между ними позволяет передавать по паре оптических волокон до 96 каналов в стандартной частотной сетке. Емкость системы может быть увеличена при использовании расширенного частотного диапазона.**

Постоянно появляющиеся типы сервисов и новые пользовательские приложения создают все большую нагрузку на магистральную транспортную сеть. Это значит, что для транспортировки высокоскоростного трафика требуется технология передачи данных, которая, с одной стороны, обладает достаточной производительностью, с другой предоставляет оператору возможности масштабирования сети без изменения инфраструктуры. Этим требованиям удовлетворяет технология спектрального мультиплексирования (WDM – Wavelength Division Multiplexing), которая уже почти 30 лет является основной технологией построения магистральных волоконно-оптических сетей связи.

WDM – это технология физического уровня, которая позволяет передавать одновременно несколько информационных каналов по одному оптическому волокну, используя для этого различные длины световых волн. Каналы могут добавляться постепенно и иметь разную скорость и форматы передачи, что дает возможность операторам наращивать емкость сети и развивать различные типы сервисов на существующей сети

без прокладки дополнительных волокон.

Первые WDM-системы были двухканальными с передачей на длинах волн 1310 и 1550 нм. Несколько позже появились многоканальные решения: CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing – грубое спектральное уплотнение) и DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing – плотное спектральное уплотнение), где названия говорят о плотности расположения информационных каналов в оптическом спектре.

CWDM – технология грубого спектрального уплотнения, обеспечивающая передачу в широком диапазоне от 1260 до 1625 нм до 18 оптических каналов с шагом 20 нм между ними. CWDM-система не предполагает наличия в линии оптических усилителей, так как большинство каналов не входит в рабочий диапазон длин волн эрбиевого усилителя, а значит, максимальная длина регенерационного участка ограничена параметрами трансиверов и физическими свойствами волокна. Однако благодаря большему межканальному расстоянию снижаются требования к конструкции приемопередающих модулей (трансиверов) и пассивной оптики, в частности мультиплексоров. Как следствие, и стоимость CWDM-решений меньше по сравнению с DWDM.

Таким образом, применение технологии грубого спектрального уплотнения целесообразно там, где требуется недорогое решение с небольшим расстоянием между абонентами, необходимая пропускная способность не превышает 10 Гбит/с на канал, а масштабирование системы в сторону существенного увеличения числа несущих не предусмотрено.

Мощный толчок развитию DWDM-систем дало появление эрбиевых усилителей (EDFA) в начале 1990-х гг. Эрбиевый усилитель позволяет равномерно усилить информационные каналы на разных длинах волн как раз в том спектральном диапазоне оптического волокна

На сайте [t8.ru](http://t8.ru) в разделе «Публикации» можно бесплатно ознакомиться с большим количеством научных материалов по системам спектрального уплотнения.

на, где затухание сигнала минимально (С-диапазон, 1530–1565 нм). Таким образом, появление эрбиевых усилителей открыло возможность построения многоканальных систем, обеспечивающих передачу данных на протяженные расстояния без электрической регенерации сигнала.

Технология передачи DWDM создает базис для организации гибких высокоскоростных интеллектуальных сетей, обеспечивая прозрачную передачу постоянно растущего трафика, в том числе чувствительного к задержкам. Технология поддерживает скорости от 150 Мбит/с до 800 Гбит/с на одну длину волны.

Производители не останавливаются на достигнутом и непрерывно ищут аппаратные и алгоритмические решения для повышения скорости передачи данных.

DWDM может применяться не только для организации магистральных систем связи между крупными населенными пунктами, но и в городских оптических сетях. Еще один тренд развития DWDM-систем задают крупнейшие центры обработки данных, которые подталкивают разработчиков и производителей оборудования вырабатывать новые технические решения для увеличения емкости существующих систем передачи по оптическим волокнам, что для операторов обозначает удешевление в пересчете на бит/с.

Новое направление, где в скором времени технология окажется востребованной, – агрегация и прозрачная передача трафика, критичного к задержкам. Так, транспортное ядро развивающихся сетей 5G будет, несомненно, построено по принципу DWDM.

В крупнейшем ЦОДе ПАО «Сбербанк» установлены DWDM-системы «Волга» российского производства.

## Основные компоненты DWDM-системы

### Транспондеры/мультиплектеры

Адаптация клиентских сигналов к сетям DWDM может быть проведена с помощью блоков транспондеров и мультиплектеров (агрегирующих транспондеров). Эти блоки применяются для преобразования несущей длины волны сигнала, поступающего от клиентского оборудования, к установленному частотному плану WDM, а оптического сигнала, приходящего из линии, – к несущей длине волны клиентского оборудования, то есть совмещают в себе как передающую, так и приемную часть.

Рассмотрим более подробно функционал транспондеров и мультиплектеров в общем виде, а далее поясним разницу между ними.

Оба устройства осуществляют передачу линейного сигнала на нужной

**Основные компоненты DWDM-системы:**  
– транспондеры/мультиплектеры, формирующие сигналы на разных длинах волн  
– мультиплекторы, объединяющие сигналы из разных волокон на разных длинах волн в одном волокне, и демультиплекторы, разделяющие несколько сигналов на разных длинах волн из одного волокна по разным волокнам  
– усилители, усиливающие многоканальный сигнал при его передаче по оптическому волокну

длине волны в рамках выбранного формата спектрально

го уплотнения. Компоненты в составе передающей части (лазеры и модуляторы), а также алгоритмы упреждающей коррекции ошибок (FEC – Forward Error Correction) обеспечивают достаточную его устойчивость к шумам

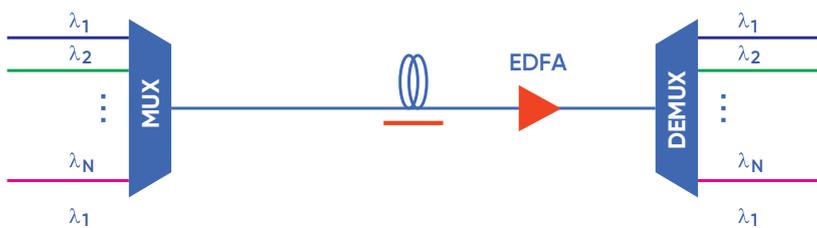


Рисунок 1. Общий вид WDM-системы с передачей по одному волокну оптических сигналов на разных длинах волн

Существует множество FEC-алгоритмов кодирования, которые различаются по сложности и производительности. Одним из наиболее распространенных кодов первого поколения FEC является код «Рида – Соломона» (255, 239).

SD-FEC является алгоритмом кодирования третьего поколения, обеспечивающим передачу данных для оптических сетей 100G на большие расстояния и с большими ретрансляционными участками.

и искажениям. Использование в блоках транспондеров/мультиплекторов современных форматов модуляции позволяет обеспечивать высокую пропускную способность сети. С другой стороны, приемо-передающие модули обеспечивают прозрачное преобразование различных клиентских интерфейсов в линейный с возможностями мониторинга и контроля ошибок.

Расширяют функционал транспондеров и мультиплекторов за счет поддержки решений операторского класса: принимаются меры по увеличению надежности, времени непрерывной работы, снижению времени перезапуска; обеспечивается удаленный мониторинг. Современные модули могут поддерживать программно-управляемую архитектуру сети SDN (Software Defined Network).

Транспондер имеет число выходных портов, равное числу клиентских. В зависимости от реализации, он может обладать функцией внутренней коммутации или жестко связывать входные и выходные порты друг с другом попарно.

В случае применения технологии OTN (Optical Transport Network), работающей в связке с DWDM и обеспечивающей перенос разнородного трафика на оптический уровень, задача устройства сводится к инкапсуляции клиентского сигнала в кадры низкого порядка ODU (Optical Data Unit), добавлению заголовка для процедуры коррекции ошибок FEC и формированию выходного цифрового кадра. Такая процедура называется фреймингом, а выходной цифровой кадр, модулирующий оптическую несущую, – OTU (Optical Transport Unit).

В отличие от транспондера, мультиплектор не просто преобразует клиентский сигнал в формат кадра OTN, но и выполняет функции цифрового мультиплексирования. Так же, как и в транспондере, на первом этапе данные клиента размещаются в кадры низкого порядка (в OTN их часто называют Tributary ODU). Мультиплексор OTN синхронно мультиплексирует ODU низкого порядка в ODU высокого порядка (Line ODU). По групповому кадру рассчитывается контрольная сумма, и на выходе мультиплексора формируется только один линейный кадр OTU. Соответственно, мультиплектор формирует один оптический канал. Длина волны излучения, как правило, перестраивается в рабочем диапазоне.

На стороне приема сигналы, поступающие на вход транспондера, детектируются и восстанавливаются цифровым фотоприемником. В случае реализованной процедуры коррекции ошибок FEC соответствующие блоки обнаруживают и устраняют ошибки, возникающие в процессе распространения сигнала по линии связи.

**Очевидно, что применение мультиплекторов позволяет эффективнее использовать пропускную способность линии связи, так как экономит порты на оптических DWDM-мультиплексорах. Вторым преимуществом устройств является экономия вычислительного ресурса системы, так как контрольная сумма FEC (Forward Error Correction) рассчитывается не для каждого клиента, а для всего кадра OTU.**

## Оптические мультиплексоры

Мультиплексоры делятся по возможности изменения канального плана и по количеству каналов. В первой классификации можно выделить 2 группы: фиксированные, когда каждый оптический канал направляется в заранее жестко заданное волокно, и пе-

В РОССИИ  
но-оптические  
ные системы

Российские волоконно-оптические  
телекоммуникационные системы



Благодаря технологии селективного переключения спектральных каналов (WSS) ROADM обеспечивает гибкое управление спектральными каналами и позволяет строить смешанные сети любой топологии. Узел ROADM может переключать спектральный канал на ввод/вывод и сквозную передачу без прерывания трафика.

реконфигурируемые ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) – в них можно программно изменять распределение каналов по волокнам. По количеству каналов выделяют терминальные (многоканальные), где число каналов  $N = 40 - 96$  и мультиплексоры ввода-вывода OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) с количеством вводимых/выводимых каналов от 1 до 16.

Все транспонеры (мультиплексоры) подключаются к оптическому терминальному мультиплексору – пассивному устройству, позволяющему объединять сформированные ранее оптические каналы в одно оптическое волокно. На приемной стороне происходит демultipлексирование оптического сигнала – операция, обратная процедуре мультиплексирования.

Именно мультиплексоры/демultipлексоры являются WDM-устройствами в чистом виде, так как их параметры и определяют частотный план системы связи: плотность расположения каналов, их количество, полосу пропускания по каждому каналу.

Фиксированные многоканальные мультиплексоры изготавливаются на основе AWG-решеток (Array Waveguide Grating), а малоканальные могут быть реализованы в виде набора тонкопленочных TFF-фильтров (Thin Film Filter).

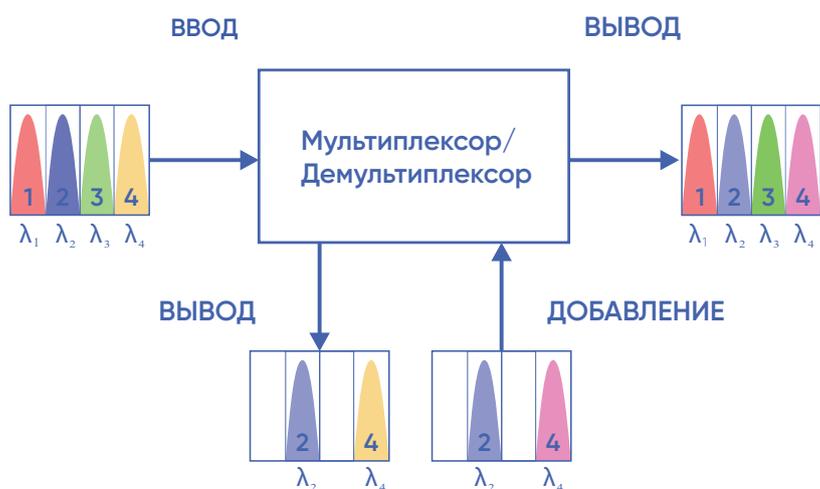


Рисунок 2. Принцип работы реконфигурируемого мультиплексора ввода-вывода (ROADM)

Потери на канал в мультиплексорах на основе AWG-решеток не зависят от числа каналов и составляют примерно 5 дБ.

Для малоканальных мультиплексоров потери определяются числом последовательно включенных фильтров (обычно число каналов  $N = 2^m$ , где  $m = 1 - 4$  – количество последовательно включенных фильтров) и составляют от 1,5 до 6 дБ. Ограничение на количество каналов (8 – 16) малоканальных мультиплексоров вызвано тем, что потери в каскаде фильтров сравниваются с потерями в AWG-решетке многоканального мультиплексора.

Для формирования равномерного группового сигнала устройства могут содержать в своем составе управляемые оптические аттенюаторы для каждого мультиплексируемого канала. Кроме того, они могут быть оборудованы измерителями канальной мощности для удаленного мониторинга спектра каналов, а также мониторингом разъемом для подключения измерительного оборудования без разрыва оптической линии.

## Реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода-вывода ROADM

Отдельного рассмотрения требует группа программно-реконфигурируемых мультиплексоров ввода-вывода.

Если фиксированные мультиплексоры (OADM) жестко определяют маршруты каналов, то гибкость и масштабируемость системы может быть обеспечена с помощью реконфигурируемого мультиплексора – ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer), который программно изменяет распределение каналов по волокнам (рисунок 2).

Число WSS-матриц (Wavelength Selective Switch), основных компонентов ROADM, определяет функциональность мультиплексора ввода-вывода и число доступных направлений. Матрица WSS направляет пришедшую



Рисунок 3. Простейшая схема однокаскадного EDFA-усилителя

на входной порт длину волны на любой из N выходов. С появлением прецизионных технологий на фотонном уровне появилась возможность более эффективного использования спектрального ресурса за счет высокой гранулярности WSS-устройств.

### Передача сигнала по линии. Оптическое волокно. Оптический усилитель

Передача сформированного группового оптического сигнала осуществляется по специальным оптическим волокнам. Для большинства систем, использующих технологию DWDM, оптимальными считаются стандартные одномодовые волокна (SSMF – Standard Single Mode Fiber), параметры которых определяются рекомендацией МСЭ G.652.

Специально для использования в протяженных DWDM-системах было разработано волокно с сердцевинной из чистого кварца (PSCF – Pure Silica Core Fiber, рекомендация G.654D). Типовое применение таких волокон – подводные линии связи. Для систем с большим количеством каналов могут использоваться волокна с увеличенной площадью моды (SLA). В таких волокнах уменьшаются нелинейные искажения и увеличивается допустимая мощность сигнала, что в конечном счете ведет к увеличению дальности безрегенерационной передачи сигналов в волоконно-оптической линии связи.

Для облегчения монтажа и прокладки может использоваться волокно с пониженной чувствительностью к изгибным

потерям, оно описывается рекомендацией G.657.

Оптическое волокно является источником затухания, а значит, на линии необходимо размещать специальные устройства – оптические усилители, восстанавливающие уровень оптического излучения, увеличивая тем самым дальность передачи. Типичное расстояние между узлами усиления – от 60

**К значимым параметрам оптического волокна относят коэффициент затухания, коэффициент дисперсии, коэффициент нелинейности.**

до 100 км, оно оптимизируется для каждой проектируемой линии.

Для оптических систем связи применяют усилители, в основе которых могут быть различные физические процессы. Наиболее популярными являются усилители на основе волокна, легированного ионами эрбия EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Такие устройства эффективно усиливают сигналы в C-диапазоне, спектральной области наименьшего поглощения кварцевого стекла 1535...1565 нм.

Структура простейшего однокаскадного усилителя приведена на рисунке 3. Оптическая накачка может происходить попутным или встречным образом одним или несколькими лазерами, излучающими на длинах волн 980 или 1480 нм. Ионы эрбия поглощают энергию накачки, переходя в возбужденное состояние. При взаимодействии с сигнальным излучением на длине волны 1550 нм происходит переход возбужденного иона эрбия

Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана) – неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твердого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением частоты излучения.

в основное состояние, сопровождающийся излучением единичного фотона на длине волны 1550 нм.

В современных многоканальных протяженных DWDM-системах применение однокаскадных усилителей неэффективно. Как правило, используются многокаскадные схемы, обеспечивающие настройку требуемого коэффициента усиления за счет управления встроенным аттенуатором в VGA-устройствах (Variable Gain Amplifier), выравнивание спектра группового сигнала с помощью сглаживающих оптических фильтров GFF (Gain Flattening Filter).

Кроме EDFA-усилителей в технике связи могут использоваться волоконные усилители, использующие рамановское рассеяние. Усилители, основанные на эффекте Рамана, могут быть сосредоточенными и распределенными. Если сосредоточенные сходны по своим эксплуатационным свойствам с EDFA-устройствами, то использование распределенных усилителей требует повышенных мер без-

опасности из-за высоких мощностей лазера накачки и хороших параметров волоконно-оптической линии. Усилители Рамана незаменимы на больших пролетах (более 150 км), где нет возможности организации большого числа промежуточных усилительных пунктов.

В ранней классификации оптических усилителей выделялись следующие группы по функциональному назначению: усилители мощности или бустеры, устанавливающиеся сразу после оптического мультиплексора; линейные усилители в промежуточных точках протяженных линий связи; предварительные усилители на входе демультиплексора для достижения оптимального уровня сигнала на входе оптических приемников. Однако в последнее время производители DWDM-систем уходят от подобного разделения, а параметры усилителя подбираются непосредственно под проектируемую линию с учетом неидеальности амплитудно-частотной характеристики всех активных и пассивных компонентов системы.

Оптический сигнал, распространяясь по волокну, не только затухает, но и искажается за счёт дисперсии различного рода. Под дисперсией в оптике понимают зависимость фазовой скорости световых волн от частоты. Дисперсия носит название хроматической дисперсии, что подчёркивает факт разложения света на его спектральные составляющие.

## Причины возникновения ошибок в системах DWDM при приеме оптического сигнала

Прежде чем рассматривать методы увеличения производительности DWDM-системы и модернизации оптических транспортных сетей в целом, рассмо-

три неоптимальном уровне оптической мощности на входе транспондера.

Хроматическая дисперсия, уширяя оптические импульсы, уменьшает экстинкцию и затрудняет их прием. Шумы усиленного спонтанного излучения ASE (Amplified Spontaneous Emission) накапливаются при прохождении групповым сигналом цепочки оптических усилителей.

В линиях, не содержащих оптических усилителей, как правило, основными причинами ошибок являются дисперсия, шумы и перегрузка на приеме. Внедрение оптических усилителей сводит указанные проблемы из фундаментальных в инженерные: перед подачей сигнала на приемник его усиливают до оптимального уровня (вдали от границ чувствитель-

**Количество ошибок в битовом потоке данных характеризуют величиной BER (Bit Error Rate), равной отношению ошибочно переданных бит к общему количеству переданных бит. Заказчик системы связи оговаривает максимально допустимое значение BER, которое обычно находится на уровне  $10^{-10}$ ... $10^{-12}$ .**

трим несколько причин возникновения ошибок на приеме.

Шумы приемника (или систематические ошибки при его перегрузке) возникают

ности и перегрузки). Для компенсации дисперсии линия оборудуется специальными устройствами – компенсаторами, восстанавливающими длительность импульсов перед подачей сигнала на вход приемной части транспондера.

Платой за преодоление первых двух причин возникновения ошибок является внесение шума ASE и нелинейных искажений. Последнее обусловлено иным характером работы линии. Теперь в пределах регенерационной секции существуют несколько (иногда – несколько десятков) усилительных секций, причем в начале каждой из них, где интенсивность оптического сигнала достаточно велика, сигнал подвергается действию нелинейных эффектов.

Обусловленное экономическими причинами желание более эффективно использовать спектр усилителя и минимизировать число усилителей в линии приводит к появлению спектра плотно расположенных каналов большой мощности, что и приводит к развитию внутриканальных и межканальных нелинейных эффектов.

Транспондеры и мукспондеры, проектируемые для работы в сетях, не содержащих оптических усилителей (как правило, CWDM), оптимизируют, улучшая чувствительность и устойчивость к дисперсии. Для DWDM-решений это неактуально – там требуется каналобразующее оборудование, устойчивое к влиянию шума ASE и нелинейным искажениям сигнала.

Можно определить граничные допустимые значения параметров, описывающих входной оптический сигнал, как значения, дающие на выходе требуемый коэффициент ошибок при оптимальных остальных параметрах.

Для CWDM-оборудования так определяется чувствительность приемника (минимально допустимое значение мощности на оптическом приемнике, при котором неискаженный оптический сигнал принимается с величиной ошибок не выше некоего заданного значения) и штрафы по дисперсии. Для DWDM-оборудования основной характеристикой является устойчивость к влиянию шума ASE.

Величина шума ASE описывается параметром OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio), а каждый DWDM-транспондер/мукспондер – значением требуемого.

**Количество каналов ограничено доступным спектральным диапазоном (при использовании типовых усилителей EDFA – примерно 1530–1565 нм, что соответствует 48 каналам по 100 ГГц или 96 каналам по 50 ГГц; при использовании технологий гибкого спектра – FlexGrid – количество каналов может отличаться).**

Требуемый OSNR – есть минимально допустимое значение OSNR, при котором еще возможен прием сигнала в пределах требуемого заказчиком BER.

Спектральная эффективность системы связи представляет собой отношение скорости передачи информации (бит/с) к ширине полосы пропускания (Гц) и измеряется в единицах бит/с/Гц. Спектральная эффективность характеризует, насколько эффективно в произвольной системе связи используется полоса частот.

## Методы увеличения производительности DWDM-систем

Определим понятие «производительность системы связи» как произведение полной скорости передачи системы связи  $C$  на дальность передачи  $L$ . Под дальностью в магистральных системах подразумевается дальность передачи в многопролетной линии с промежуточными усилителями без регенерации

сигнала. Очевидно, производительность DWDM-системы можно наращивать двумя способами: с одной стороны, увеличивая скорость передачи системы связи, с другой – добиваясь увеличения предельной дальности передачи.



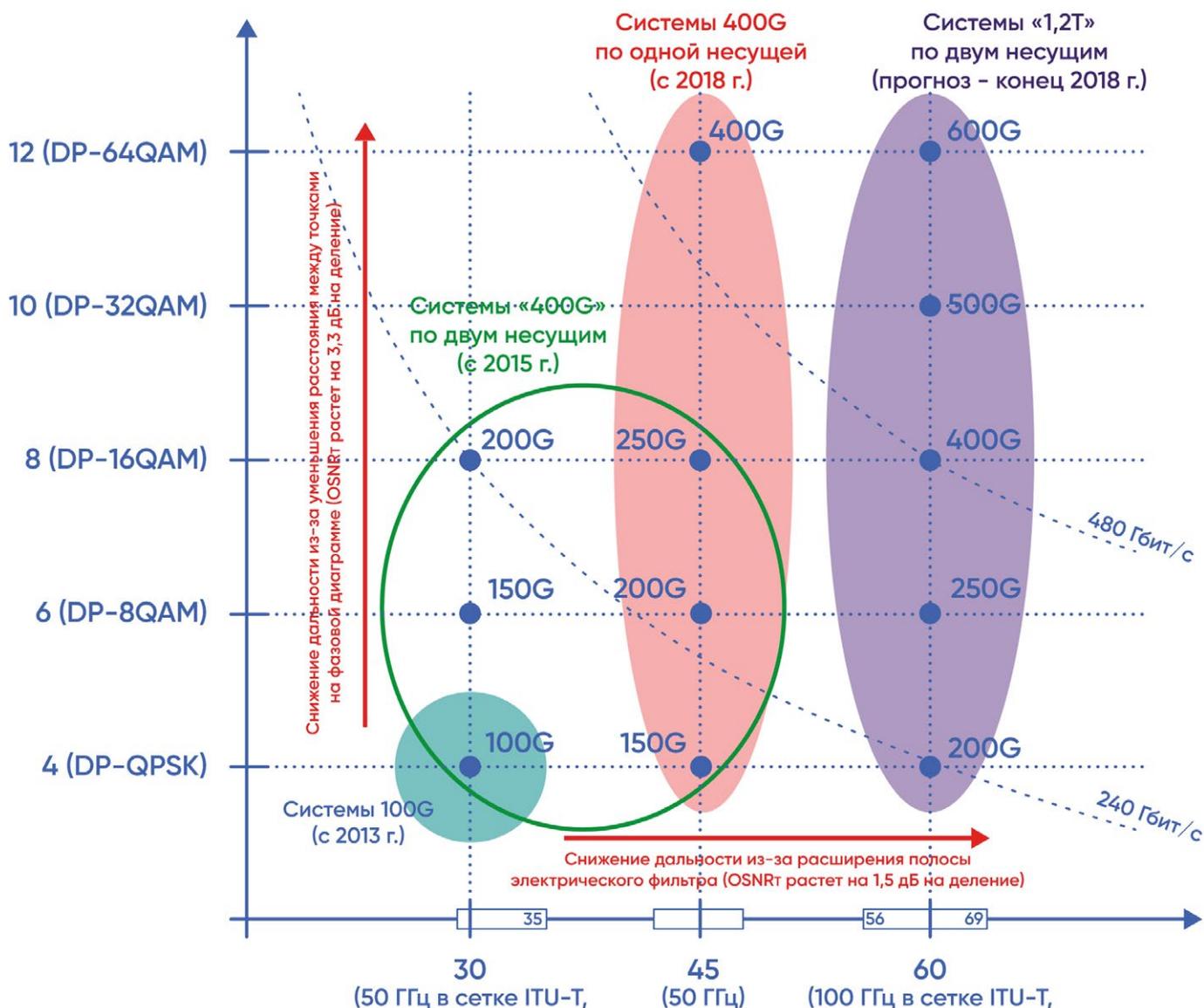


Рисунок 4. Пути увеличения скорости передачи данных. По горизонтали: символьная скорость (гигасимволов/сек) и занимаемый оптической несущей спектральный диапазон. По вертикали: символьная эффективность (бит/символ) и формат модуляции

### Увеличение скорости передачи данных в системе

Скорость передачи данных в системе с одинаковыми каналами определяется произведением количества каналов на скорость в каждом канале. Скорость в канале определяется двумя факторами: символьной скоростью и символьной эффективностью, рисунок 4.

Скорость передачи данных системы связи (суммарная битовая скорость  $V$ , бит/с = бод) складывается из скоростей передачи данных в каждом канале (для

системы с одинаковыми каналами это произведение количества каналов  $N_{CH}$  на скорость  $V_B$  [бит/с] в каждом канале). Максимальное количество каналов в одной паре волокон задано текущим стандартом спектрального уплотнения (например, CWDM, DWDM 100GHz C, DWDM 50GHz C+L). Битовая скорость канала  $V_B$  является произведением символьной скорости  $V_S$  (символов/с) на символьную эффективность используемого формата модуляции  $E_S$  (бит/символ):  $V_B = V_S \cdot E_S$ . Параметр  $E_S$  зависит от количества информации, переносимой одним символом  $M = \log_2(N)$ , где  $N$  - число значений,

При амплитудной модуляции изменяемым параметром является мощность оптического излучения передатчика.

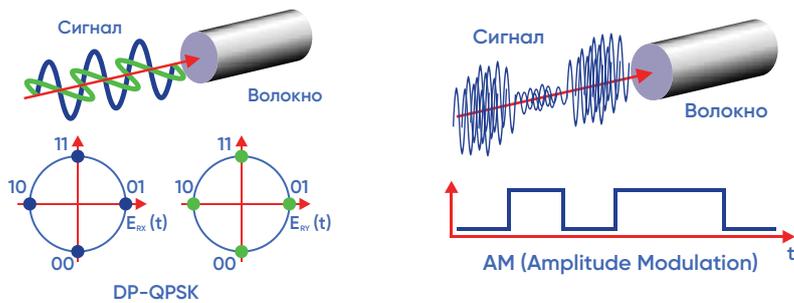


Рисунок 5. Структура сигнала DP-QPSK и AM

которое может принимать один символ. Так для наиболее распространенного для 100G-транспондеров формата модуляции DP-QPSK информация кодируется четырьмя значениями фаз в каждом из двух состояний поляризации, т.е. в каждой поляризации можно передавать 2 бита на символ. Тогда для DP-QPSK  $ES = 2 \cdot \log_2(4) = 4$  бит/символ.

### 1) Рост символьной скорости

Увеличение символьной скорости  $V_S$  фактически означает увеличение частоты работы модулятора передатчика. Предельные значения символьной скорости электрического сигнала определяются свойствами материалов, высокочастотной электроники, модуляторов. Доступное значение с точки зрения реализации на стандартной элементной базе находится на уровне 95 Гбод, оно достигнуто в системах с канальной скоростью 800 Гбит/с при использовании формата модуляции DP-64QAM.

С теоретической точки зрения волоконно-оптические системы можно рассматривать как классические полосовые системы, к которым применима хорошо разработанная для классической радиосвязи теория модуляции.

### 2) Многоуровневые форматы модуляции

Исторически первыми появились амплитудные форматы модуляции оптического излучения в модификациях NRZ (Non-Return-to-Zero) и RZ (Return-to-Zero), где код RZ более устойчив к нелинейным искажениям в волокне. Они обеспечивали скорости передачи данных до 10 Гбит/с. Использование амплитудного формата модуляции оказалось затруднительным при скоростях больше 40 Гбит/с, так как ширина оптического спектра становится сравнимой с межканальным интервалом DWDM-систем. Этот факт, а также неустойчивость амплитудно-модулированных сигналов к нелинейным искажениям привели к переходу на фазовые форматы модуляции, где информацию несет в себе фаза оптического сигнала или разница фаз соседних символов (вследствие неопределенности фазы пришедшего символа часто требуется именно дифференциальное кодирование).

В современных решениях используются одновременно все степени свободы сигнала: амплитуда, фаза и поляризация светового излучения. Наиболее распространенным форматом для 100-гигабитных систем на сегодняшний день является DP-QPSK (Dual Binary Quadrature Shift Keying), где информация кодируется двумя состояниями поляризации и четырьмя значениями фаз (рисунок 5).

На рисунке 6 схематично представлен процесс формирования сигнала в формате DP-QPSK. Непрерывное излучение несущего лазера разделяется на две ортогональные поляризации, каждая из которых подается на квадратурные модуляторы и модулируется информационным сигналом с битовой скоростью, большей, чем 25 Гбит/с, за счет добавления FEC-заголовков. При этом по одному из плеч интерферометров Маха-Цендера, устройств в основе квадратурных модуляторов, создается фазовый сдвиг на 90 градусов с помощью управляющего напряжения.

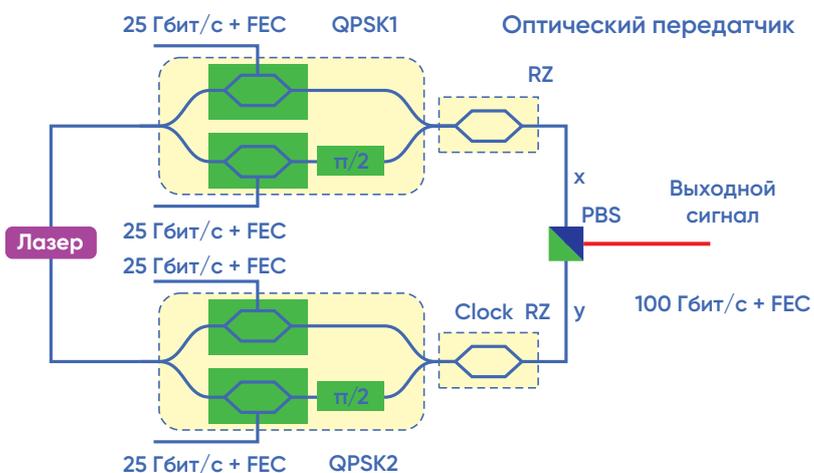


Рисунок 6. Структура передатчика DP-QPSK

Таким образом формируются QPSK-



**Если частота излучения опорного лазера на приеме совпадает с несущей частотой лазера на передаче, система является гомодинной. В гетеродинных приемниках, напротив, промежуточная частота должна намного превышать частоту передачи сигналов.**

сигналы в каждой из поляризации, которые объединяются с помощью поляризационного сплиттера, образуя структуру DP-QPSK. Каждый символ формата DP-QPSK переносит 4 бита информации (по 2 бит/символ в каждой из поляризации).

Переход на скорости 200/400 Гбит/с и выше задействует также амплитуду света. Соответствующие форматы модуляции, DP-16QAM и DP-64QAM, существенно увеличивают спектральную эффективность, обеспечивая большую скорость передачи данных в привычной полосе 50 ГГц.

В современных DWDM-решениях с плотным расположением оптических каналов, как правило, свободных межканальных интервалов нет, а значит, увеличение спектральной эффективности является единственным способом увеличить общую скорость передачи данных в системе без расширения используемого спектрального диапазона. Это одна из основных причин перехода от амплитудных к более сложным фазовым когерентным форматам модуляции. Плата за такой выигрыш – уменьшение дальности передачи.

Увеличение числа каналов может происходить освоением новых спектральных диапазонов, что представляет сложность из-за ограниченной эффективной полосы оптических усилителей.

Другое направление – уменьшение межканального интервала в освоенном оптическом диапазоне. Оно требует перехода на новый стандарт спектрального уплотнения и может привести к росту межканальных помех.

### Увеличение дальности передачи

Второе направление наращивания производительности DWDM-системы – увеличение дальности. Она, в свою очередь, зависит от множества факторов: устойчивости выбранного транспондера к шумам ASE и нелинейным искажениям, параметров усилителей и волокон, взаимного расположения каналов и т. д. Дальность передачи определяется в том числе пороговой чувствительностью приемника (дБ) – величиной, которая показывает, при каком отношении уровня полезного сигнала к уровню шума в линии OSNR<sub>Rt</sub> (Optical Signal to Noise Ratio) он еще способен безошибочно детектировать поступающий сигнал.

Часто перед операторами стоит задача увеличения скорости передачи с сохранением дальности. Такая модернизация линии может происходить путем замены транспондеров на более совершенные с целью сохранения требуемого OSNR.

Преимущества когерентных сетей заключаются в комбинации передовых функций: амплитудной и фазовой модуляции, поляризованного мультиплексирования, когерентного детектирования и сложных процессов цифровой обработки сигналов.

### 3) Наращивание числа несущих

### 1) Когерентный прием

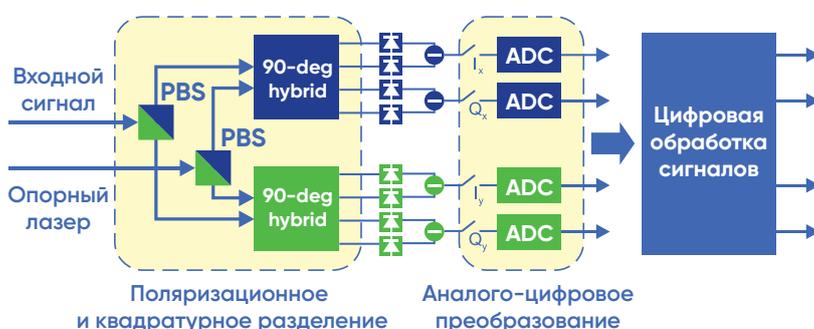


Рисунок 7. Структура когерентного приемника

Для сохранения дальности в сочетании со спектрально-эффективными форматами модуляции применяется технология когерентного приема. Суть когерентного детектирования заключается в смешении поступающего из линии информационного сигнала с излучением опорного лазера. При этом происходит такое преобразование спектра в оптическом диапазоне, что формируемый далее в фотоприемнике электрический сигнал содержит полную информацию

об исходном оптическом сигнале.

Структура когерентного приемника изображена на рисунке 7. С помощью поляризационных сплиттеров информационный сигнал и опорное излучение приемного лазера делятся на две ортогональные компоненты. 90-градусный оптический смеситель необходим для смешивания поляризационных составляющих сигнала с X- и Y- компонентами приемного лазера.

Частота опорного лазера может свободно перестраиваться в диапазоне  $\pm 20$  МГц относительно частоты несущей передающего лазера. Ширина излучения лазеров не превышает 100 ГГц в современных когерентных решениях. Четыре пары сигналов с балансных фотодетекторов, улучшающих чувствительность приема, поступают на входы аналого-цифровых преобразователей. Таким образом формируется 4 символьных потока.

Несмотря на то что принципы когерентного приема были давно известны, их применение в оптическом диапазоне долгое время было затруднено из-за сложности и дороговизны высокостабильных узкополосных лазеров с необходимостью синхронизации фазы и частоты принятого сигнала и излучения гетеродина. Проблему синхронизации фаз решило возникновение мощных технологий обработки сигналов в цифровом виде. Так, в блоке DSP (Digital Signal Processing) один из алгоритмов – коррекция разности фаз с применением восстановления несущих. Он исключает необходимость аппаратной синхронизации частот и фаз источников.

## 2) Цифровая обработка сигнала. Помехозащищенное кодирование.

На сегодняшний день DSP является неотъемлемой частью когерентного транспондера. Согласно рисунку 7, четыре цифровых потока с выходов АЦП поступают в блок DSP, где, помимо упомянутых синхронизации и фазовой диверсификации, реализованы и другие алгоритмы

**Наиболее распространенные помехозащищенные алгоритмы для когерентных систем: HD FEC (Hard Decision Forward Error Correction), реализованный на основе каскадных кодов, и SD FEC (Soft Decision Forward Error Correction) на основе «мягкого» принятия решения. Оптимальный тип кода выбирается для конкретной линии и зависит от требуемой дальности, значения накопленной дисперсии и других параметров системы.**

компенсации, необходимые для безошибочного восстановления сигналов.

Первый функциональный блок процессора исключает неточности входного интерфейса – временное рассогласование между четырьмя компонентами из-за неравенства оптических и электрических путей внутри когерентного приемника, неравенство их амплитуд. Далее происходит преобразование асинхронной частоты дискретизации в частоту 2 отсчета на символ. В DSP реализована компенсация накопленной в линии хроматической дисперсии, что исключает необходимость установки в линию физического компенсатора, вносящего дополнительные потери.

Для получения отчетливой фазовой диаграммы необходимо также минимизировать отклонение амплитуды от некоторого предустановленного среднего значения. Устраняется вращение диаграммы в фазовой плоскости. Оценивается и компенсируется фазовый шум, накопленный в том числе из-за действия нелинейных эффектов в волокне. После того как все этапы обработки пройдены, определяются значения принятых символов. Последним шагом является процедура исправления ошибок FEC.

Использование избыточного кодирования при цифровой обработке многоуровневого сигнала может давать выигрыш по требуемому OSNR до 9 дБ. К полезной нагрузке в каждом транспондере добавляется FEC-заголовок, размер которого определяется типом кода.

Под суперканалом понимается набор из нескольких оптических поднесущих, которым можно управлять в оптическом тракте как единым целым. Использование нескольких поднесущих само по себе не позволяет повысить спектральную эффективность системы.

## Гибкость и масштабируемость современных оптических транспортных систем

ROADM-коммутация может применяться одновременно с OTN-коммутацией.

Задачу достижения гибкости и масштабируемости оптического транспорта можно условно разделить на несколько направлений: модернизация физических компонентов системы и организация управляемости сети на программном уровне.

### Перестраиваемые форматы модуляции. Суперканалы

Появление когерентных решений для DWDM-систем стало первым шагом в сторону повышения производитель-

ванной 50ГГц-сетки к гибкому решению с гранулярностью до 12,5 и даже 6,25 ГГц. Суперканал представляет собой единую управляемую структуру из нескольких поднесущих. Когерентные оптические каналы и суперканалы с программируемой архитектурой требуют изменения архитектуры реконфигурируемых оптических мультиплексоров ROADM на конфигурацию FlexGrid-CDC, подробно описанную ниже.

### Коммутация на фотонном уровне. CDC FlexGrid ROADM

После того как когерентные DWDM-каналы, в том числе суперканалы, заполнены трафиком, гибкий ROADM должен при необходимости перераспределить отдельные длины волн по требуемым направлениям. Выше была описана классическая конфигурация оптического мультиплексора ввода-вывода. Однако использование суперканалов как средства повышения пропускной способности требует от линейных устройств гибкости и масштабируемости. Еще большее расширение функционала FlexGrid ROADM заложено в аббревиатуре CDC (Colorless, Directionless, Contentionless).

Функция «Colorless» обеспечивает отсутствие привязки длины волны к порту ROADM, то есть возможность вводить и выводить любую длину волны на любом оптическом выходе устройства.

«Directionless» поддерживает составление оптического маршрута от транспондера на любое из направлений ROADM без привязки к входному и выходному портам.

«Contentionless» разрешает наличие на входных портах сигналов на одинаковых длинах волн, пришедших с разных агрегирующих транспондеров. Такая ситуация обрабатывается на оптическом уровне, разводя одинаковые длины волн в разные выходные порты без смешения.

**Новая идеология FlexGrid предполагает уход от фиксированной сетки частот к повышенной гранулярности и доработку классического ROADM в сторону поддержки технологии суперканала с несколькими поднесущими.**

Недостатками пакетных технологий передачи данных являются зависимость задержки от нагрузки и негарантированная доставка пакетов. Кроме того, данные протоколы в большинстве своём не поддерживают процедуры коррекции ошибок. Организация сети на оборудовании OTN предполагает наличие втроенных механизмов управления и контроля, процедур защиты соединений, а также гарантированную доставку трафика и исправление ошибок.

Каналы 100G+ обеспечили существенное увеличение спектральной эффективности. Однако развитие когерентных технологий на этом не остановилось и открыло новые направления развития. Современные сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), применяемые в блоках транспондеров, позволяют программным образом перестраивать формат модуляции для когерентных каналов, масштабируя скорость передачи данных. Такой функционал позволяет оптимизировать сеть, выбирая между дальностью и скоростью, для каждого оптического канала.

Как известно, переход на более высокий уровень модуляции неизбежно уменьшает дальность системы связи. Но высокоскоростные цифровые потоки (200G+) будут передаваться на большие расстояния с использованием не одной, а нескольких поднесущих, то есть с использованием структуры суперканала. Этот факт, в свою очередь, требует перехода DWDM-системы от фиксиро-

Физическая реализация CDC FlexROADM имеет высокую стоимость, так как требует наличия большого числа матриц оптической коммутации WSS (англ. Wavelength Selective Switch). Экономическая целесообразность использования таких узлов должна определяться для каждой конкретной транспортной системы.

Там, где требуется более дешевое решение и не подразумевается тотальное программное управление, могут быть использованы усеченные варианты (C ROADM, CD ROADM). Там, где отсутствует изменение боковой скорости и линейные сигналы не являются суперканалами, не требуются высокая гранулярность и Flex-решение. Блок ROADM должен поддерживать команды, поступающие по OSC-каналу от системы управления, что позволит устройству быть узлом программно-управляемой сети.

### Коммутация на электрическом уровне

Выше рассматривалась коммутация на уровне длин волн в устройстве WSS, где разбора сигналов до цифровых контейнеров не происходит. Более сложный вариант – реализация OTN-кросс-коннекта (ОКС). Наличие матрицы кросс-коммутации, или так называемой свитч-фабрики, – стандартное требование заказчиков DWDM-оборудования для сетей с топологией сложнее, чем «точка-точка». ОКС представляет собой управляемую интегральную схему, назначение которой – установление логических соединений между портами подключенных клиентских и линейных карт. В терминологии OTN для каждого ODU низкого порядка программно назначается временной интервал для мультиплексирования в определенный ODU высокого порядка.

Построение логических соединений внутри шасси позволяет формировать каналы любой сложности и протяженности на сети оператора в автоматическом режиме. Добавляется функция гибкого резервирования как отдельных клиентских каналов, так и магистральных линий

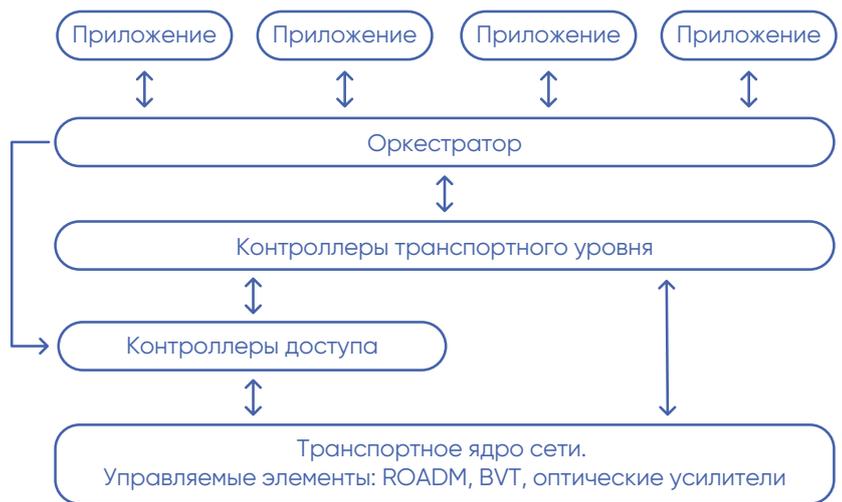


Рисунок 8. Модель SDN транспортной сети

**На данном этапе в качестве программно-управляемых устройств рассматриваются следующие элементы системы: оптические мультиплексоры ввода-вывода ROADM в конфигурации CDC-FlexGrid, блоки когерентных перестраиваемых транспондеров в конфигурации BVT (Bandwidth Variable Transceivers), блоки оптических усилителей с настраиваемым коэффициентом усиления.**

«горячим» резервом без необходимости ручной коммутации в случае аварий.

Конкретная реализация свитч-фабрики определяется подключенными линейными картами, которые будут формировать требования к пропускной способности кросс-матрицы, ее гранулярность, внутренний протокол. На сегодняшний день наибольший интерес для конвергентных сетей, объединяющих разные типы трафика, представляют матрицы кросс-коннекта, реализующие одновременно коммутацию пакетов и коммутацию каналов. К такой кросс-плате могут подключаться линейные карты как с OTN-интерфейсами, так и с Ethernet-портами, а коммутация будет происходить на уровне приоритетных пакетов внутри устройства.

Над реализацией открытых интерфейсов для поддержки деагрегированных сетей и SDN-функционала транспортного оборудования ведётся работа сразу в нескольких международных консорциумах: ODTN (Open Disaggregated Transport Network), TIP (Telecom Infra Project), OpenROADM MSA (Multisource Agreement).

## SDN. Программно-управляемые сети

Второе направление развития транспортных оптических сетей – внедрение управляемости на программном уровне.

Программно-определяемая сеть SDN (Software Defined Network) – это сеть с реализованным методом администрирования для управления услугами, когда плоскость управления CP (Control Plane) отделяется (абстрагируется) от лежащей плоскости пользовательских данных DP (Data Plane).

Помимо CP и DP появляется надстройка в виде так называемого оркестратора.

Оркестратор управляет SDN-контроллерами, отслеживающими состояние различных сетевых ресурсов. Контроллеры собирают статистику по всем устройствам сети и взаимодействуют через оркестратор, который оперирует упрощенной моделью нижестоящих уровней на основе получен-

ных данных и выполняет предоставление и оптимизацию ресурсов из конца в конец.

Сегодня актуальная задача – интеграция технологии SDN с оптическим оборудованием и устройствами OTN. Первое обеспечит управляемость и контролируемость на физическом уровне, построение маршрутов передачи трафика с оптимальными физическими параметрами, такими как усиление, формат модуляции, в зависимости от расстояния. Международные стандартизирующие организации, в частности MSA (Multi Source Agreement), разрабатывают спецификации по взаимодействию системы управления с оптическими устройствами.

Второе направление, взаимодействие плоскости управления с OTN-устройствами, обеспечит гибкость построения маршрутов на уровне OTN. В данном случае управляемыми устройствами будут являться OTN-транспондеры и блоки кросс-коммутации.

# ДЛЯ ЗАМЕТОК

A series of horizontal dotted lines for taking notes.

A series of horizontal dotted lines across the page, likely intended for writing.

## **T8 | DWDM-СИСТЕМЫ**

T8 – российский разработчик и производитель телекоммуникационного оборудования спектрального уплотнения (DWDM) и решений для оптических сетей связи

### **Москва**

107076, улица Краснобогатырская, 44/1  
+7 (499) 271 61 61

### **Санкт-Петербург**

195027, проспект Энергетиков, 10 лит. А, пом. 314  
+7 (812) 611 03 12

info@t8.ru  
t8.ru

Информация в данном документе предоставлена для общего ознакомления с компанией T8, производимым оборудованием и новыми разработками. Предоставленная информация в результате влияния различных факторов может нести прогностический характер и отличаться от реальных результатов. Опубликованная информация не является публичной офертой, а также предложением в какой-либо иной форме на заключение сделок. Компания T8 оставляет за собой право изменять указанную информацию в любое время без предварительного уведомления.

Логотип является зарегистрированным товарным знаком. Все права защищены.