Интегрированные пакетно-оптические транспортные сети большой пропускной способности

Часть 2. Функциональное назначение сетевых уровней в интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуре

С.С.Коган, к.т.н., советник генерального директора компании "Т8" по формированию технической стратегии / kogan@t8.ru

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2026.137.5.50.60

В цикле статей рассматриваются интегрированные пакетно-оптические решения IPoDWDM (IPoOLS/P-OTS – Packet-Optical Transport System) для передачи данных по оптическим каналам систем OTN/DWDM с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с и выше, а также управления открытой, построенной на оборудовании разных производителей, сетью. В первой части речь идет о динамической маршрутизации пакетно-ориентированных соединений по каналам (длинам волн) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), во второй – о функциональном назначении сетевых уровней интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуры, в третьей – о вариантах реализации. Четвертая часть цикла посвящена стандартизации и эволюции решений для интегрированных пакетно-оптических транспортных сетей большой пропускной способности.

Введение

Более 20 лет продолжался спор о том, какая сетевая архитектура – IPoDWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) или IPoOT (Optical Transport) – более перспективна. Однако практика показала, что оба варианта заслуживают внимания в равной мере.

Классическая многоуровневая сетевая архитектура IPoOT предусматривает полное разделение уровней IP/Ethernet (L3/L2) и волоконно-оптического транспортного OTN/DWDM (L0/L1). Она идеальна для сложных мультисервисных операторских сетей связи, поскольку поддерживает агрегацию разнородных клиентских потоков данных и гарантирует выполнение строгих соглашений об уровне обслуживания (SLA). Ее основное преимущество – наличие демаркационной (разделительной) точки между

Таблица 1. Сравнение традиционного многослойного IPoOT и интегрированного IPoDWDM сетевых архитектурных решений

Характеристики	Традиционная многослойная сетевая архитектура IPoOT	Интегрированная IPoDWDM сетевая архитектура
Затраты на оборудование	Высокие: маршрутизатор + транспондер + дополнительные полки для блоков	Ниже: маршрутизатор + сменные оптические (pluggable) модули приемопередатчиков, устанавливаемые в порты маршрутизатора
Энергопотребление	Высокое: множество дискретных подсистем	Ниже: единая интегрированная система
Потребность в пространстве для оборудования в стойках	Большая: требуется место для размещения маршрутизаторов и транспондеров	Ниже: консолидированные/ интегрированные решения IP/Optics
Задержка (Latency)	Выше из-за преобразования O-E-O в транспондере	Ниже, благодаря прямому оптическому соединению
Операционная сложность	Высокая: домены управления для IP и волоконно-оптического уровней (доменов) сети разделены	Ниже: упрощенные операции с единым конвергентным сетевым уровнем (доменом)
Управление и обслуживание сети	Четкое разграничение между IP и волоконно-оптическим уровнями (доменами) сети	Размытая граница между IP и волоконно-оптическим уровнями (доменами) сети; для обслуживающего персонала потребуются новые навыки и опыт

сетевыми уровнями (доменами) IP/Ethernet (L3/L2) и волоконно-оптического транспортного OTN/DWDM (L0/L1), что полезно для эксплуатации, позволяет проводить независимое обновление маршрутизаторов и оптической транспортной сети.

Дальность связи на волоконно-оптическом транспортном уровне OTN/DWDM, обеспечивающем прозрачную передачу разнообразных сигналов (SDH, Ethernet, Fiber Channel, Infiniband и т. п.), варьируется от десяти до нескольких тысяч километров, что определяется назначением сети (сеть обеспечения взаимодействия ЦОДов, местная и городская, зоновая и региональная, магистральная) и типом используемых когерентных встроенных и/или сменных модулей приемопередатчиков.

В оборудовании OTN/DWDM используется гибкая сетка частот FlexGrid, диапазоны длин волн C+L и передовые схемы упреждающей или прямой коррекции ошибок FEC (Forward Error Correction), для оптических когерентных каналов с разной пропускной способностью поддерживаются различные форматы модуляции и значения символьной скорости.

В консолидированной сетевой архитектуре IPoDWDM предусмотрена интеграция оптических приемопередатчиков DWDM непосредственно в маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы. Сетевая архитектура IPoDWDM не является чем-то новым. Новизна – в широком распространении сменных (pluggable) оптических когерентных модулей приемопередатчиков, как правило, в компактном конструктивном исполнении (Form Factor) QSFP или OSFP для оптических каналов (длин волн) с пропускной способностью от 100 до 400, 800 Гбит/с и более.

В сетевой архитектуре IPoDWDM размеры транспондеров/мукспондеров, устанавливаемых в полку и в стойку, уменьшаются до уровня компактного, помещающегося в порту IP-маршрутизатора и/или пакетного коммутатора, сменного оптического модуля приемопередатчика. Оптические сигналы,

формируемые на каждом порту (интерфейсе) IP-маршрутизатора и/или пакетного коммутатора, объединяются с помощью оптического мультиплексора/демультиплексора в групповой сигнал DWDM, который затем передается/принимается по паре оптических волокон оптической линейной системы OLS (Optical Line System) с использованием или без использования оптических усилителей и компенсаторов хроматических дисперсионных искажений. Отличия между традиционным многослойным IPoOT и интегрированным IPoDWDM сетевыми архитектурными решениями представлены в табл.1.

В базовом исполнении OIF технические спецификации оптического когерентного линейного интерфейса ZR/ZR+ в сетевой архитектуре IPoDWDM не поддерживают OTN-инкапсуляцию.

Некоторые технические спецификации, в том числе поддерживающие OTN-инкапсуляцию, были согласованы и рекомендованы в рамках документов MSA (Multi-Source Agreement), которые:

- определяют физические, электрические и оптические характеристики модулей приемопередатчиков, гарантируя их полную совместимость и взаимозаменяемость у разных производителей,
- задают габариты, тип разъема, распиновку контактов, протоколы обмена данными и оптические характеристики.

Основные требования MSA к сменным модулям OpenZR+ MSA и Open ROADM MSA:

- OpenZR+ MSA: технические спецификации объединяют наработки OIF (Optical Internetworking Forum) в части использования коррекции ошибок oFEC. Спецификация OpenZR+ MSA ориентирована исключительно на передачу сигналов Ethernet и не поддерживает клиентские сигналы или интерфейсы OTN (Optical Transport Network). Используется oFEC, оптимизированный под пакетную передачу. Для спецификации Open ZR+ MSA дальность связи обычно составляет от 80 до 480 + км, в зависимости от выбранного режима модуляции и пропускной способности:
  - до 80–120 км: базовый режим для городских сетей (Metro), работает напрямую без дополнительного усиления,
  - до 400–480 + км: предельная дальность при применении более сложных форматов модуляции (например, DP-16QAM). В таких сценариях на линии требуется использовать оптические усилители (EDFA) и при необходимости компенсаторы дисперсии.

Модули приемопередатчиков Open ZR+ MSA, выпускаемые обычно в исполнении QSFP-DD, поддерживают гибкую настройку длины волны (Flexgrid C-band) для работы в сетях DWDM.

Эти технические спецификации разработаны компаниями Acacia Communications (Cisco), Juniper Networks, Lumentum, InnoLight, Fujitsu Optical Components и NTT Innovative Devices (ранее NTT Electronics) для протяженных телекоммуникационных маршрутов, проходящих через промежуточные узлы с оптической коммутацией (ROADM). В последующем к этой группе присоединились компании Microsoft, Marvell (Inphi) и Arista Networks.

- Open ROADM MSA: технические спецификации рассчитаны на прозрачную мультисервисную передачу данных (Ethernet и OTN трафика от 100 до 400 Гбит/с, с возможностью интеграции в IP-маршрутизаторы). Они призваны обеспечить совместимость продукции разных производителей и ориентированы на операторские сети, то есть телекоммуникационную инфраструктуру, которой владеет и управляет специализированное юридическое лицо (оператор). Операторские сети предназначены для предоставления на основании лицензии общедоступных услуг связи (передача данных, доступ в интернет или мобильная телефония).

Поддержка OTN-клиентов и OTN-структуры для линейного сигнала позволяет использовать когерентные оптические решения для достижения дальности связи на сотни километров. Применяются для сетей, требующих традиционной функциональности OTN (например, многопролетных городских/региональных сетей с узлами ROADM) или жесткого разделения услуг. Реализуются обычно в форм-факторах QSFP-DD и OSFP на сетях с промежуточным усилением и узлами ROADM.

В спецификациях OpenROADM MSA для обеспечения когерентной оптической передачи стандартизированы следующие основные форматы модуляции, все с использованием обоих поляризаций DP (Dual Polarization):

- DP-QPSK для каналов 100 и 200G,
- DP-8QAM для каналов 300G,
- DP-16QAM для каналов 400G,
- гибкие форматы с вероятностным формированием созвездий PCS (Probabilistic Constellation Shaping), начиная со спецификаций Digital Spec v6.0 для каналов

Таблица 2. Различия и параметры спецификаций Open ZR+ MSA и Open ROADM MSA

Характеристика	Open ZR+ MSA	Open ROADM MSA
Основная сфера применения	Центры обработки данных (DCI), городские (Metro) и магистральные сети	Телекоммуникационные сети операторов связи, включая инфраструктуру с узлами ROADM
Поддерживаемые скорости	100, 200, 300, 400G	100, 200, 300, 400G. Также развиваются решения для 600/800G
Типы трафика	Фокусируется на передаче кадров Ethernet	Поддерживает Ethernet, OTN (Optical Transport Network) клиентские подключения и формат OTN для линейного сигнала
Форматы модуляции	DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM	DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM для каналов 400G. Гибкие форматы модуляции с формированием созвездий PCS для оптических каналов 600 и 800G
Коррекция ошибок (FEC)	oFEC с мягким (программным) решением (Soft-Decision FEC), заимствованный из Open ROADM	oFEC с мягким (программным) решением (Soft-Decision FEC) для обеспечения максимальной дальности
Конструктивное исполнение (форм-фактор)	Компактные сменные модули (обычно QSFP-DD, OSFP)	Компактные сменные модули (обычно QSFP-DD, OSFP)

600 и 800G. Технология PCS внедряется для более тонкой оптимизации спектральной эффективности и дальности в сетях DWDM.

Дальность связи зависит от конкретного типа интерфейса и скорости передачи данных:

- городские и региональные сети (Metro/Regional): для оптических каналов с пропускной способностью 100, 200 и 400 Гбит/с дальность связи составляет (в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т G.709.1 и ITU-T G.709.6) до 500 км,
- магистральные протяженные сети (Long-haul): в зависимости от используемой модуляции и оптических усилителей дальность может превышать 1000–2000 км,
- интерфейсы ближнего действия: для соединений внутри дата-центров (DCI) и коротких дистанций применяются профили 400ZR и OpenZR+, охватывающие дальность от 80 до 120 км (без использования промежуточных усилителей),
- интерфейсы DCO/ZR (для ЦОДов): для прямого подключения к ЦОДам по интерфейсам 400/100GbE применяются модули с дальностью передачи до 2–10 км.

Для полной автоматизации сетевых процессов с управлением через SDN-контроллер, для сменных модулей OpenZR+ MSA и Open ROADM MSA предусмотрено использование моделей YANG и протоколов NETCONF/RESTCONF.

Основные различия и параметры спецификаций Open ZR+ MSA и Open ROADM MSA представлены в табл.2.

Сетевой уровень L3 (IP) интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуры

L3 (IP) – это третий, сетевой, уровень (Network Layer) сетевой модели OSI, отвечающий за маршрутизацию пакетов данных и логическую адресацию. Обеспечивает эффективную передачу трафика поверх оптического линейного тракта OLS DWDM (IPoDWDM) или оптического транспортного уровня OTN/DWDM (IPoOT).

Основные функции:

- маршрутизация: выбор оптимального маршрута соединения для передачи пакетов между различными сетями по IP-адресам,
- адресация: трансляция логических адресов в физические для безошибочной доставки данных на сетевом уровне,
- агрегация трафика: объединение множества потоков данных для дальнейшей

транспортировки по высокоскоростным оптическим каналам.

Внедрение IP-функциональности на оптической транспортной сети играет главную роль в переходе от простых "труб" для передачи данных к интеллектуальным, гибким соединениям с высокой пропускной способностью, где обеспечиваются умная маршрутизация пакетного трафика при эффективном управлении сетевыми ресурсами и высокая надежность передачи данных поверх физической волоконно-оптической сетевой инфраструктуры [18]. В интегрированных сетях уровень L3 взаимодействует с нижними оптическими уровнями (L0/L1), что позволяет динамически выделять полосу пропускания и повышать отказоустойчивость транспортной сети.

Сетевой уровень L2 (Ethernet) интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуры

L2 (Ethernet) – это второй, канальный, уровень (Channel Layer) модели OSI, отвечающий за передачу кадров (циклов, фреймов) в пределах одного сегмента сети на основе физических MAC-адресов. В пакетно-оптических сетях IPoDWDM он обеспечивает прозрачную коммутацию и агрегацию клиентских услуг (например, по стандартам MEF). Роль Ethernet (L2) функциональности заключается в эффективном агрегировании, коммутации и транспортировке клиентского пакетного трафика через высокоскоростную волоконно-оптическую инфраструктуру, обеспечении соединения между локальными сетями (LAN) пользователей и транспортной сетью оператора. Ethernet-функциональность позволяет предоставлять клиентам поверх оптического волокна управляемые, масштабируемые и экономически эффективные услуги связи за счет:

- агрегирования пакетного трафика: мультиплексоры и оптические устройства MSTP (Multiple Spanning Tree Protocol) собирают множество потоков Ethernet с низкой скоростью (например, 1/10G) и упаковывают их в более высокоскоростные потоки Ethernet от 100 до 800GbE и более, оптимизируя использование ресурсов волоконно-оптических систем передачи (ВОСП);
- управления потоками пакетных данных (L2 Switching): коммутация кадров (циклов) Ethernet на основе MAC-адресов позволяет организовать передачу данных между точками присутствия PoP (Point of Presence) оператора в конфигурациях E-Line, E-LAN, E-Tree;
- обеспечения качества обслуживания QoS (Quality of Service): помогает классифицировать трафик, а также выделять приоритеты посредством VLAN (Virtual Local Area Network), QoS и/или CoS (Class of Service) для услуг, чувствительных к задержкам, например, голосовых и видео. VLAN – это технология создания независимых логических подсетей внутри одной физической сети, позволяющая объединять устройства в группы независимо от их реального местоположения. Общая сеть разделяется на сегменты, улучшается безопасность и упрощается управление трафиком. Основное отличие QoS от CoS заключается в уровне модели OSI, на котором они работают: QoS – это комплексный метод управления качеством обслуживания на сетевом уровне IP L3, а CoS – маркировка приоритетов на канальном уровне Ethernet L2, используемая внутри локальных сетей;
- надежности и защитных механизмов: использование протоколов резервирования в кольцевой сетевой конфигурации ERP (Ethernet Ring Protection) для быстрого переключения трафика в случае обрыва оптического волокна;
- инкапсуляции данных: преобразование кадров (циклов) Ethernet для передачи по волоконно-оптической среде OTN (если это необходимо) в другие форматы передачи, например, использование GFP (Generic Framing Procedure) для передачи кадров (циклов) Ethernet в полезной нагрузке оптического транспортного блока OTN OTUk.

Сетевой уровень L1 (OTN) интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуры

L1 (OTN) – это первый, физический, уровень (Phisical Layer) модели OSI, который соответствует телекоммуникационной технологии OTN (Optical Transport Network, МСЭ-Т G.709). Технология OTN необходима, когда требуется четкое разделение ответственности (точка демаркации) между IP- и оптическим уровнем, а также для обеспечения прозрачной передачи сигналов данных при предоставлении разнообразных услуг (например, Ethernet, SDH, Fibre Channel, Infiniband и т. п.) в рамках единой сетевой инфраструктуры. Функциональность Digital Wrapper по рекомендации МСЭ-Т G.709 позволяет разместить клиентские сигналы в специализированные оптические блоки данных ODUk (Optical Data Unit), обеспечивает

прозрачную упаковку каждого клиентского потока услуг в ODUk для передачи по ВОСП в составе оптического транспортного блока OTUk (Optical Channel Transport Unit) с сохранением исходной структуры сигнала, а также информации о тактовой синхронизации и управлении. При формировании оптического транспортного блока OTUk добавляются служебные байты, например, SM (Section Monitoring), используемые для отслеживания качества сигнала и обнаружения неисправностей на каждом участке сети.

В соответствии со стандартами МСЭ-Т G.709 иерархия оптических транспортных блоков OTUk включает следующие стандартные скорости передачи данных:

- OTU1: ≈ 2,66 Гбит/с,
- OTU2: ≈ 10,70 Гбит/с (а также варианты OTU2e для прозрачной упаковки 10GbE),
- OTU3: ≈ 43,01 Гбит/с,
- OTU4: ≈ 111,80 Гбит/с (для поддержки трафика 100GbE).

Гибкость и прозрачность OTN сочетается с высокой пропускной способностью DWDM:

- прозрачная передача и инкапсуляция: по технологии OTN предусмотрено размещение (упаковка) клиентских сигналов в оптические блоки данных ODUк (контейнеры) при сохранении структуры клиентских сигналов и информации о тактовой синхронизации, что позволяет передавать на транспортном уровне любые клиентские потоки данных. В соответствии со стандартами МСЭ-Т G.709 иерархия оптических блоков данных (до 100 Гбит/с) включает следующие стандартные скорости передачи данных:
  - ODU0: ≈ 1,25 Гбит,
  - ODU1: ≈ 2,5 Гбит,
  - ODU2/ODU2e: ≈ 10 Гбит/с,
  - ODU3: ≈ 40 Гбит/,
  - ODU4: ≈ 100 Гбит/с;
- эффективное мультиплексирование/демультиплексирование: по технологии OTN предусмотрено размещение (упаковка) нескольких низкоскоростных клиентских потоков данных в высокоскоростные каналы с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с и выше. Это позволяет повысить эффективность рабочего диапазона частот (длин волн) систем DWDM для передачи данных. По технологии OTN предусмотрено использование оптических транспортных блоков OTUk с различными уровнями пропускной способности: от OTU0 (в стандарте SONET) для эффективной инкапсуляции и транспортировки трафика Gigabit Ethernet 1,25 Гбит/с, через OTU1 (2,5 Гбит/с), OTU2 (10 Гбит/с), OTU3 (40 Гбит/с) до OTU4 (100 Гбит/с). Для каналов с пропускной способностью выше 100 Гбит/с используются гибкая сетка частот FlexGrid и структура транспортного модуля OTN OTUCn-m (Optical Transport Unit Cn-m), где C = 1 означает базовую скорость передачи данных 100 Гбит/с в оптическом блоке данных ODU4; n – число логически объединенных оптических блоков данных ODU4 с пропускной способностью 100 Гбит/с каждый (например, для канала 400 Гбит/с n равно 4); m – число используемых компонентных слотов (Tributary Slots, TS) по 5 Гбит/с каждый. Например, оптический канал с пропускной способностью 150 Гбит/с определяется как OTUC2-30;
- эксплуатация, администрирование, обслуживание и предоставление услуг OAM&P (Operations, Administration, Maintenance and Provisioning): по технологии OTN предусмотрен 6-уровневый мониторинг тандемных соединений (TCM), который обеспечивает важный для диагностики сквозной контроль качества обслуживания соединений. 6-уровневый мониторинг тандемных соединений TCM (Tandem Connection Monitoring) – одна из основных функций технологии OTN, регламентированная стандартом МСЭ-Т G.709, – позволяет одновременно контролировать качество передачи данных (ошибки, работоспособность) на шести различных сегментах оптического канала. Основные характеристики TCM:
  - локализация неисправностей: TCM дает возможность операторам точно определить, на каком участке сети (между какими узлами) ухудшилось качество сигнала или возникли ошибки, даже если этот участок – часть более длинного маршрута,
  - вложенность и сегментация: TCM поддерживает до шести уровней вложенности (TCM1–TCM6). Это означает, что можно контролировать сквозной путь E2E (End-to-End), вложенные в него сегменты, то есть участки между операторами, а также подсети или отдельные соединения;
- обнаружение и исправление ошибок с использованием FEC (Forward Error Correction): по технологии OTN обеспечивается высокая целостность данных, что позволяет, исправляя ошибки передачи, увеличивать дальность передачи данных

без промежуточной регенерации, то есть оптоэлектронного (O-E-O) преобразования;
- гибкая коммутация (OTN Switching): по технологии OTN можно переключать трафик на уровне оптических блоков данных ODUk, что повышает эффективность управления услугами [15].

Основные аспекты использования стандартов OTN в этих случаях представлены ниже:
- интеграция функциональности OTN: даже при прямой DWDM передаче IP-трафика (Direct Connect) использование OTN обеспечивает:
  - улучшенную коррекцию ошибок (FEC): повышает дальность передачи и надежность связи,
  - мониторинг характеристик: позволяет контролировать качество сигнала на уровне "цифровой оболочки",
  - прозрачность: возможность передачи и взаимного изолирования различных типов трафика;
- интеграция средств когерентного приема: в современных решениях IPoDWDM сменные оптические когерентные модули приемопередатчиков Open ROADM MSA для каналов с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с устанавливаются непосредственно в IP-маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы. Для обеспечения функций управления, мониторинга и прямой коррекции ошибок FEC поддерживаются циклы (кадры) OTN (например, оптические транспортные блоки OTUk).

Сетевой уровень L0 (DWDM) интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуры

L0 (DWDM) в интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуре (IPoDWDM) – это базовый, физический, уровень (Physical Layer) модели OSI, который соответствует телекоммуникационной технологии, отвечающий за передачу потоков данных посредством объединения/разделения оптических каналов по длине волны оптического излучения. Обеспечивается путем одновременной организации по одной паре оптических волокон множества потоков данных (информационных оптических каналов) на разных длинах волн оптического излучения. Технология DWDM на уровне L0 – фундамент для построения оптических транспортных сетей с оптическими каналами пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с и более:
- мультиплексирование (объединение, уплотнение): объединение десятков и сотен оптических сигналов (длин волн) в групповой сигнал DWDM позволяет многократно увеличить пропускную способность существующей сетевой инфраструктуры без прокладки новых волоконно-оптических кабелей;
- прозрачность для данных: технология DWDM относится исключительно к длинам волн оптического излучения, поэтому на L0 (DWDM) уровне обеспечивается прозрачная передача любого типа трафика SDH, OTN, Ethernet, Fiber Channel, Infiniband и т. п. Infiniband – это сверхскоростная технология сетевой коммуникации с крайне низкой задержкой, созданная специально для ЦОДов и суперкомпьютеров. Она используется для связи серверов и систем хранения данных там, где требуется максимальная скорость обмена массивами информации;
- усиление оптических сигналов: обеспечение требуемой дальности связи с использованием усилителей EDFA на оптическом волокне, легированном эрбием, а также рамановских усилителей (Raman), основанных на нелинейном эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света в рабочем оптическом волокне, то есть в среде передачи данных по ВОСП. Оптические усилители позволяют передавать сигналы на сверхдальние расстояния (тысячи километров) без необходимости промежуточного преобразования их в электрический сигнал (то есть без O-E-O-преобразования);
- экономическая эффективность: решение позволяет операторам сетей связи, облачной сетевой инфраструктуры с ЦОДами и предприятиям масштабировать сети по пропускной способности и снижать стоимость передачи одного гигабита данных по сравнению с использованием для каждого оптического канала отдельного оптического волокна;
- гибкость при использовании многосвязных реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода-вывода (MD-ROADM): современные DWDM-системы поддерживают реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода-вывода (MD-ROADM), что позволяет удаленно, без физического вмешательства персонала в конфигурацию узлов сети, менять маршруты подключения оптических каналов (длин волн).

В отличие от обычного линейного узла ROADM, который работает с двумя направлениями, узел

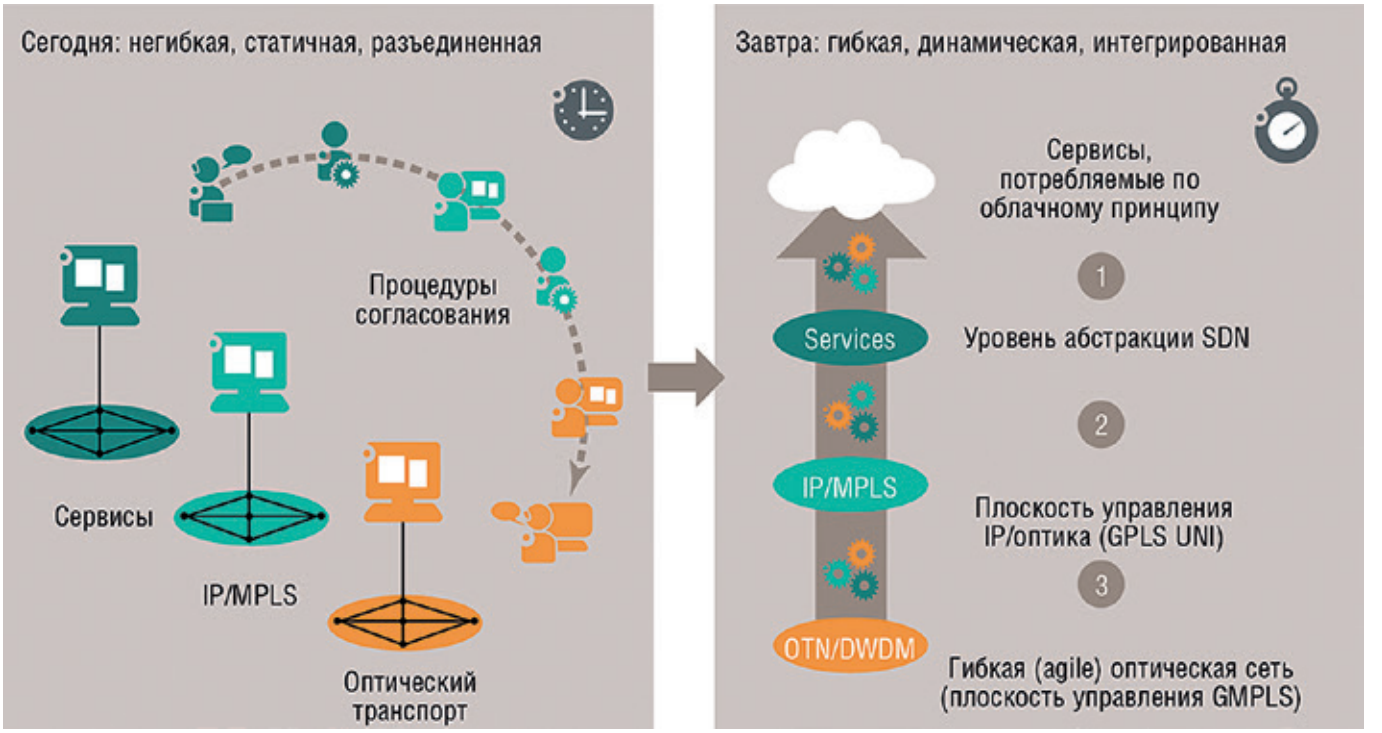


Рис.4. Переход к динамической, программируемой, интегрированной сети [16]

MD-ROADM позволяет коммутировать оптические каналы (длины волн) между тремя и более направлениями:

- многонаправленность MD (Multi-Degree): обеспечивает транзит и добавление/удаление оптических каналов (длин волн) в разных направлениях;
- дистанционная реконфигурация: позволяет удаленно менять конфигурацию сети (добавлять или перенаправлять оптические каналы) с помощью программного обеспечения, без выезда технического специалиста для ручной перекоммутации волокон (no fiber manual patch);
- современные MD-ROADM поддерживают разнообразные конфигурации узлов сети, включая CD и CDC (Colorless/Directionless/Contentionless):
  - colorless (бесцветность): возможность подключить любой приемопередатчик (или транспондер/мукспондер) к любому порту, не привязываясь к конкретной длине волны,
  - directionless (направленность): возможность направить выбранную длину волны в любое доступное направление (волокно),
  - contentionless (без конфликтов): возможность использовать для ввода/вывода (add/drop) одновременно на нескольких различных направлениях узла MD-ROADM, без возникновения конфликтов, оптических каналов с одинаковой длиной волны оптического излучения,
  - автоматическая балансировка мощности: обеспечение автоматической регулировки в различных оптических каналах уровней мощности оптического сигнала.

К преимуществам применения MD-ROADM следует отнести:

- гибкость: быстрое выделение пропускной способности и изменение маршрутов трафика в режиме реального времени,
- эффективность: оптимизация использования волокон и оборудования в DWDM-сетях,
- самовосстановление соединений в сети с паутинной (Mesh) инфраструктурой: автоматическое переключение трафика на резервные пути при обрыве волокна,
- снижение операционных затрат (OPEX): удаленное управление снижает эксплуатационные расходы, связанные с физическим вмешательством персонала в работу сети.

Роль функциональности SDN (T-SDN) в интегрированной пакетно-оптической транспортной инфраструктуре

Протоколы SDN (Software-Defined Networking) или T-SDN (Transport SDN) ориентированы на динамическое управление ресурсами сетевой инфраструктуры и оптимизацию использования ее пропускной способности.

Технология SDN в оптических транспортных сетях (иногда ее называют T-SDN, то есть Transport SDN) – это архитектура управления, которая отделяет логический уровень управления и контроля сетью от физического уровня (оборудования) OTN/DWDM ВОСП. Появление широкомасштабных архитектур программно-определяемых сетей (SDN) открывает операторам связи множество возможностей для автоматизации, оптимизации и обеспечения безопасности работы интегрированных IP-оптических сетей, а также координации взаимодействия между сетевыми уровнями и доменами за счет сочетания открытых, программируемых и стандартизированных интерфейсов. Использование SDN-контроллеров обеспечивает координацию функционирования уровней IP и OTN, включая автоматическое резервирование и балансировку нагрузки. С помощью SDN/T-SDN операторы и сервис-провайдеры смогут лучше монетизировать свои сетевые активы, предоставляя их как виртуализированную услугу поверх облачной сетевой инфраструтуры (рис.4).

По мере перехода IP-маршрутизаторов в область когерентной оптической передачи данных они сталкиваются с новыми методами управления портами и каналами связи, которые традиционно находились в ведении волоконно-оптической транспортной сети. Такие операционные задачи, как выделение оптических каналов, обнаружение соединений, техническое обслуживание и устранение неполадок оптической связи, будут включены в сферу общего управления маршрутизатором. Этот сдвиг ускорит и усилит потребность в гибких и мощных инструментах для эффективной работы на разных уровнях навигации и координации операционной деятельности между IP- и волоконно-оптическими сетями. SDN поможет реализовать новые услуги, предоставляемые поверх облачной сетевой инфраструктуры, в том числе связанные с взаимодействием публичных и корпоративных ЦОДов [19].

Особенности применения T-SDN в волоконно-оптических сетях состоят в следующем:

- разделение уровней: плоскость управления (Control Plane) отделена от плоскости передачи данных (Data Plane),
- централизация управления: контроллер T-SDN видит всю топологию сети и управляет множеством устройств с разной функциональностью от разных производителей,
- динамическая настройка: возможность выделять, изменять или удалять оптические каналы связи в реальном времени с использованием гибкой сетки частот (FlexGrid),
- автоматизация: ускорение предоставления услуг (Provisioning) – с дней/недель до минут с минимизацией человеческих ошибок,
- виртуализация: создание виртуальных сетей поверх волоконно-оптической физической сетевой инфраструктуры.

Технология T-SDN позволит:

- централизованно программировать, автоматизировать и динамически выделять пропускную способность соединений, обеспечивая гибкость в управлении оптическими каналами и решая задачи управления соединениями между доменами сети,
- повысить эффективность использования сетевых ресурсов,
- обеспечить инжиниринг трафика в оперативном режиме,
- динамически адаптировать емкость сети к изменяющимся требованиям,
- повысить оперативность внедрения и изменения услуг и приложений.

Сочетание L3 (IP) и L1 (OTN) функциональности в интегрированной IP/оптической транспортной инфраструктуре

В современных транспортных сетях требуется сочетание высокой пропускной способности (OTN/DWDM физический уровень) и умной маршрутизации. Интеграция функциональностей L3 и OTN позволит операторам объединять IP-маршрутизаторы с OTN/DWDM транспортными платформами по технологии IPoDWDM, что снижает капитальные и эксплуатационные расходы за счет устранения промежуточных уровней оборудования.

В отличие от уровня L2, где предусмотрена коммутация по MAC-адресам, L3 обеспечивает более гибкое управление и связь между разными типами сетей, что критически важно для магистральных сетей, работающих с IP-пакетами. Сочетание IP (Layer 3) и OTN

(Layer 1) функциональности в современных оптических транспортных сетях призвано объединить гибкость маршрутизации пакетов с высокой надежностью, прозрачностью и производительностью ВОСП:

- IP (L3-маршрутизация): обеспечиваются интеллектуальное управление трафиком, перенаправление пакетов, выбор маршрута, обработка сложных сетевых топологий и использование ориентированных на предоставление услуг функций, включая QoS,
- OTN (L1-транспорт): обеспечивает "цифровую оболочку" (Digital Wrapper) для прозрачной упаковки любого типа трафика (SDH, Ethernet, Fiber Channel, Infiniband и т. п.), эффективные механизмы коррекции ошибок (FEC) и надежное защитное переключение каналов (protection switching) за время менее 50 мс.

Технология OTN выполняет для IP-маршрутизаторов функцию надежной транспортной "трубы" с высокой пропускной способностью. IP-маршрутизаторы, в свою очередь, оптимизируют загрузку этих транспортных "труб", обеспечивая их эффективное использование. На IP-уровне осуществляется управление логическими маршрутами соединений, а на уровне OTN/ROADM – физическими каналами, по которым эти логические маршруты соединений прокладываются, что дает возможность гибкого масштабирования возможностей волоконно-оптической транспортной сети.

К преимуществам сочетания технологий IP (L3) и OTN (L1) следует отнести повышение эффективности использования ресурсов волоконно-оптической транспортной сети. Технология OTN позволяет упаковывать (функционал Grooming) мелкие потоки данных ODUk в высокоскоростные каналы OTUk с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с, улучшая тем самым заполнение потоками данных оптических каналов (длин волн), особенно в сетях с разнородным трафиком. Экономическая эффективность решения повышается за счет реализации функции обхода маршрутизатора RB (Router Bypass), когда транзитный трафик коммутируется на уровне OTN/ROADM (L1). При этом высвобождаются активные порты IP-маршрутизатора, что снижает энергопотребление и тепловыделение. Технология OTN обеспечивает мониторинг характеристик OAM (Operations, Administration and Maintenance), гарантируя выполнение соглашений об уровне обслуживания SLA для критически важных приложений.

Объединение физического уровня передачи (OTN/DWDM) с уровнем сетевой маршрутизации IP позволяет эффективно управлять трафиком, повысить надежность и оптимизировать расходы оператора за счет:

- интеллектуальной маршрутизации трафика: коммутаторы и маршрутизаторы способны в транспортной сети на уровнях L2/L3 анализировать IP-адреса и определять оптимальные маршруты передачи данных между разными узлами и сетями. Гибкость управления трафиком между различными сегментами сети обеспечивается благодаря эффективной маршрутизации пакетного трафика, установлению соединений с использованием протоколов MPLS и коммутации потоков данных по MAC-адресам;
- управления качеством обслуживания QoS: обеспечивается возможность приоритизации трафика, что жизненно важно для обеспечения качества предоставляемых услуг в сетях с пакетной передачей данных;
- высокой надежности с быстрой перемаршрутизацией: благодаря протоколам динамической маршрутизации обеспечиваются логическая адресация и определение маршрута передачи данных через различные сети, а также автоматическое перенаправление пакетного трафика в обход поврежденных оптических каналов, что повышает общую отказоустойчивость сети;
- виртуализации и сегментации сетей: выделяются ресурсы для различных приложений или клиентов, поверх единой волоконно-оптической сетевой инфраструктуры создаются виртуальные сети (VLAN, VPN).

ЛИТЕРАТУРА

1. Статическая и динамическая маршрутизация. [Электронный ресурс] URL: https://mikrotik-training.ru/kb/staticheskaya-i-dinamicheskaya-marshrutizatsiya/ (дата обращения 07.05.2026).
2. Что такое динамическая маршрутизация? [Электронный ресурс] URL: https://blog.ai-mix.ru/2024/11/18/chto-takoe-dinamicheskaya-marshrutizacziya/ (дата обращения 07.05.2026).
3. Основы технологии DWDM (Брошюра компании Т8). [Электронный ресурс] URL: https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrarx7a89we9in5xc7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (дата обращения 07.05.2026).
4. Обзор телекоммуникационных протоколов: MPLS. [Электронный ресурс] URL:https://skomplekt.com/tools/3811773.html/ (дата обращения 07.05.2026).

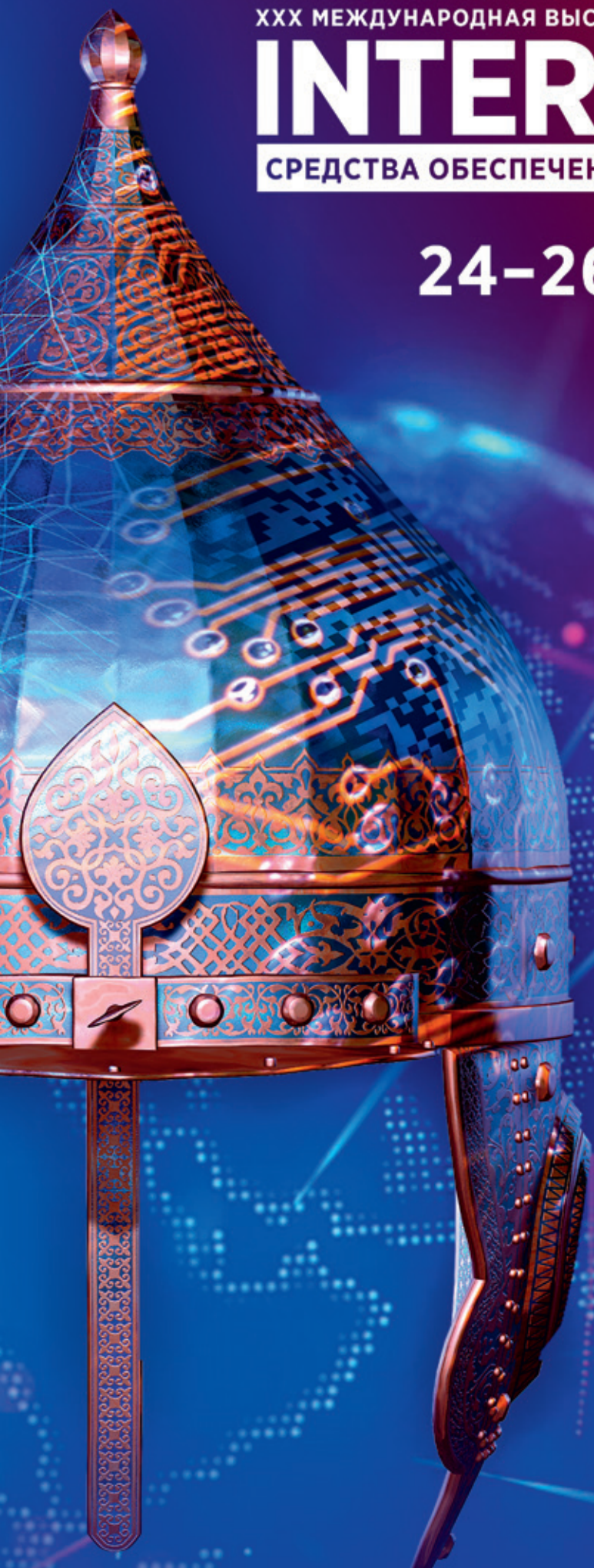
5. GMPLS объединяет сетевые уровни. [Электронный ресурс] URL: https://www.osp.ru/nets/2003/10/148943 (дата обращения 07.05.2026).
6. Концепция принудительной маршрутизации. [Электронный ресурс] URL: https://opengl.org.ru/upravlenie-trafikom-i-kachestvo-obsluzhevaniya-v-seti/kontseptsiya-prinuditelnoi-marshrutizatsii.html (дата обращения 07.05.2026).
7. **Коган С.С.** Транспортные ВОСП большой пропускной способности. Ч. 1. Стандартизация открытых линейных интерфейсов 400G со сменными когерентными оптическими модулями-приемопередатчиками // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. 2. С. 44–54. [Электронный ресурс] URL: https://t8.ru/upload/iblock/2eb/isnm7stxfkl9nmob2ha6744ons309rlx/Kogan_part_1_Last_Mile_2024_number_2_pages_44_54.pdf (дата обращения 07.05.2026).
8. **Коган С.С.**, **Наний О.Е.**, **Трещиков В.Н.** Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Ч. 1. Пропускная способность и эволюция форматов модуляции Пропускная способность и эволюция форматов модуляции // Прикладная фотоника. 2024. Т. 11. № 1. С. 84–98. [Электронный ресурс] URL: https://t8.ru/upload/iblock/f27/9yive7om7qvdco9btwcpuxw11lmdrifs/S_S_Kogan_O_E_Nanii_V_N_Treshchikov_Vysokoskorostnye_VOSP_CHast-1.pdf (дата обращения 07.05.2026).
9. Технология DSP в когерентной оптической связи. [Электронный ресурс] URL: https://www.fibermall.com/ru/blog/dsp-technology-in-coherent-optics.htm?srsltid=AfmBOopLVpXisIe_XkKoV0h_TkgOGiRVk4zXHsPutGU8mQg5HLijBidO (дата обращения 07.05.2026).
10. **Junho Cho, Peter J.** Winzer. Probabilistic Constellation Shaping for Optical Fiber Communications. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY. 2019. Vol. 37. No. 6. MARCH 15, 2019. [Электронный ресурс] URL: https://scispace.com/pdf/probabilistic-constellation-shaping-for-optical-fiber-zv2jhsi78g.pdf (дата обращения 07.05.2026).
11. Что такое программно-определяемые сети. [Электронный ресурс] URL: https://cloudnetworks.ru/inf-tehnologii/programmno-opredelyaemye-seti-sdn/ (дата обращения 07.05.2026).
12. **Коган С.С.**, **Наний О.Е.**, **Трещиков В.Н.** Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Ч. 2. Дальность связи, спектральная эффективность и символьная скорость // Прикладная фотоника. 2024. Т. 11. № 2. С. 5–25. [Электронный ресурс] URL: https://t8.ru/upload/iblock/949/1p8fakl7oisl0djbkufwvr1a9srb8gf2/S_S._Kogan_-O_E_Nanii_-V_N_Treshchikov_Vysokoskorostnye_VOSP_CHast_2.pdf (дата обращения 07.05.2026).
13. **Коган С.С.**, **Наний О.Е.**, **Трещиков В.Н.** Перспективные оптоволоконные системы OTN/DWDM: повышение спектральной эффективности и увеличение протяженности высокоскоростных оптических каналов // Спецвыпуск журнала "Фотон-Экспресс – Наука-2023". 2023. № 6. [Электронный ресурс] URL: https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-optovolokonnye-sistemy-otn-dwdm-povyshenie-spektralnoy-effektivnosti-i-uvelichenie-protyazhennosti-vysokoskorostnyh/viewer (дата обращения 07.05.2026).
14. **Коган С.С.**, **Конышев В.А.**, **Наний О.Е.**, **Петренко И.И.**, **Трещиков В.Н.**, **Убайдуллаев Р.Р.** Новые форматы модуляции для когерентных волоконно-оптических сетей связи. Ч. 1. Традиционные и гибридные форматы квадратурной модуляции // Журнал Фотоника / Photonics Russia. 2026. № 1. [Электронный ресурс] URL: https://www.photonics.su/journal/article/11405 (дата обращения 07.05.2026).
15. Компания Ribbon. Integrated IP Optical – One Size Does Not Fit All. [Электронный ресурс] URL: https://clck.su/gUxaB (дата обращения 07.05.2026).
16. **Коган С.С.** IP + оптика: интеграция по трем направлениям // Журнал сетевых решений / LAN. 2015. № 4. [Электронный ресурс] URL: https://www. osp.ru/lan/2015/04/13045692 (дата обращения 07.05.2026).
17. **Коган С.С.** О конфигурациях типа Alien Wavelength на оптических транспортных сетях // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2017. № 6. С. 20–27. [Электронный ресурс] URL: https://www.lastmile.su/files/article_pdf/6/article_6258_210.pdf (дата обращения 07.05.2026).
18. Модель OSI. Почему она важна для облака. [Электронный ресурс] URL: https://it-grad.kz/blog/it-infrastruktura/model-osi-pochemu-ona-vazhna-dlya-oblaka (дата обращения 07.05.2026).
19. SDN: альтернатива или дополнение к традиционным сетям? [Электронный ресурс] URL: https://habr.com/ru/companies/hpe/articles/255363/ (дата обращения 07.05.2026).

XXX МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

INTERPOLITEX

NATIONAL SECURITY
НАЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА



24–26 НОЯБРЯ 2026

МОСКВА • ВДНХ
ПАВИЛЬОН 20
«ФОРУМ»

INTERPOLITEX.RU

ОРГАНИЗАТОР

БИЗОН ОБЪЕДИНЕНИЕ ВЫСТАВОЧНЫХ КОМПАНИЙ