Интегрированные пакетно-оптические транспортные сети большой пропускной способности

Часть 1. Динамическая маршрутизация пакетно-ориентированных соединений по каналам ВОСП

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2026.136.4.50.58

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

Развитие технологий передачи данных по оптическим каналам с пропускной способностью от 100 до 800 Гбит/с и выше, маршрутизации потока данных по длинам волн оптического излучения и управления открытой сетью, построенной на оборудовании разных производителей (мультивендорной), позволило перейти к интегрированным пакетно-оптическим (IP/оптическим) транспортным решениями IPoDWDM/IPoOLS/P-OTS большой пропускной способности. В этом случае IP-маршрутизация потоков данных и их передача по оптическим каналам (длинам волн) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) объединяются в экосистему. Предполагается, что в перспективе для оптических транспортных сетей будут использоваться решения OON (Open Optical Networking), то есть сети станут полностью "открытыми" и "программируемыми", а граница между OSI уровнями L1/L0 (физический волоконно-оптический уровень OTN/Optical Transport Network и DWDM/Dense Wavelength Division Multiplexing) и уровнями L3/L2 (логический уровень IP/MPLS/Ethernet) будет размываться за счет использования для управления такими сетями функций ИИ (искусственного интеллекта).

При использовании протоколов динамической маршрутизации IP-трафика (Wavelength Routing) по оптическим каналам волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) маршрутизаторы автоматически определяют оптимизированные по дальности связи и задержке сигнала маршруты передачи данных по сети. В этом случае технологии оптической транспортной сети OTN/DWDM могут использоваться в качестве промежуточного уровня, который, поддерживая трафик IP, обеспечивает динамическую маршрутизацию соединений (IP-маршрутизацию) по оптическим каналам (длинам волн) с пропускной способностью, измеряемой в терабитах в секунду [1, 2]. Современные ВОСП, использующие технологию DWDM, позволяют передавать по одному волокну на разных длинах волн в C & L диапазонах более 160 потоков данных [3].

Динамическая маршрутизация IP-трафика по оптическим каналам волоконно-оптических систем передачи применяется в современных телекоммуникационных оптических транспортных сетях и сетях DCi (Data Center interconnect) для обеспечения взаимодействия ЦОДов. В основе динамической маршрутизации лежат функциональности GMPLS (General Multiprotocol Label Switching)/ASON (Automatic Switch Optical Network) и ROADM (Wavelength Routing), а также программно-определяемые сетевые решения SDN (Software-Defined Networking).

Многопротокольная коммутация по меткам MPLS (Multiprotocol Label Switching) – это метод перенаправления трафика в сетях с помощью коротких меток (labels), а не традиционной IP-маршрутизации. MPLS используется в магистральных и корпоративных сетях как технология передачи данных между уровнями L2 (канальным) & L3 (сетевым) модели OSI для обеспечения скорости и надежности передачи данных, приоритезации трафика для обеспечения требуемого качества обслуживания QoS (Quality of Service) и создания виртуальных частных сетей VPN (Virtual Private Network) [4].

Технология обобщенной многопротокольной коммутации по меткам GMPLS и оптической сети с автоматической коммутацией каналов ASON появилась в результате эволюции и распространения принципов MPLS на транспортные сети OTN/DWDM, ориентированные на установление соединений [5]. Она позволила объединить преимущества волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) и алгоритмов маршрутизации IP, обеспечить в многоуровневых сетях динамическую установку соединений по определенным маршрутам.

Маршрутизация потока данных от источника к приемнику по определенному физическому маршруту связана с функциональностью волновой маршрутизации WR (Wavelength Routing), обеспечивающей обнаружение на этом маршруте свободного оптического канала (длины волны) [6]. Стандартизация технологии GMPLS/ASON в IETF (RFC 3945) и МСЭ-Т (G.8080/Y.1304; G.7713.2/Y.1704.2) гарантирует возможность ее использования на открытых (мультивендорных) сетях, построенных на оборудовании разных производителей.

SDN контроллер управляет и контролирует соединения на интегрированных пакетно-оптических транспортных сетях P-OTS высокой пропускной способности. При перегрузке сети или обрыве оптического волокна для передачи данных оперативно строится новый маршрут соединения. Выбор маршрута соединения с учетом ограничений (Constraint-based Routing) означает, что этот маршрут вычисляется не просто по кратчайшему расстоянию (как в протоколах OSPF или IS-IS), а с учетом таких специфических требований к качеству обслуживания (QoS) и ресурсам сети, как задержка сигнала, физические параметры оптического волокна (например, хроматические и поляризационные дисперсионные искажения, затухание сигнала), а также доступные для создания маршрута соединения длины волн оптического излучения.

Когерентное обнаружение/прием линейного сигнала в интегрированных пакетно-оптических транспортных сетях высокой пропускной способности

Когерентное обнаружение/прием оптического линейного сигнала на сетях P-OTS – основная технология, стандартизируемая в МСЭ-Т для высокоскоростных сетей с пропускной способностью оптических каналов от 100 до 800 Гбит/с и выше. В отличие от прямого обнаружения/приема IM/DD (Intensity Modulation/Direct Detection), когерентное обнаружение/прием позволяет восстанавливать не только интенсивность, но и фазу/поляризацию оптического сигнала, что значительно увеличивает спектральную эффективность ВОСП [7, 8].

Основные аспекты когерентного обнаружения/приема (Coherent Detection) согласно стандартам МСЭ-Т представлены ниже.

- Принцип действия когерентного обнаружения/приема:
  - смешение сигналов: принятый из линии сигнал смешивается с излучением местного опорного источника нормированного излучения (локального генератора, лазера),
  - восстановление фазы: метод позволяет извлекать информацию, закодированную в фазе и поляризации форматов модуляции DP-QPSK, DP-mQAM, где DP – Dual Polarization, что невозможно при прямом детектировании,
  - обработка сигналов в цифровом сигнальном процессоре ЦСП: после когерентного детектора

сигнал оцифровывается и в ЦСП компенсируются хроматические CD (Chromatic Dispersion) и поляризационные модовые PMD (Polarization Mode Dispersion) дисперсионные искажения.

- Основные рекомендации МСЭ-Т по параметрам интерфейсов когерентного обнаружения/приема:
  - G.694.1: сетка частот для DWDM-систем, использующих DP-mQAM форматы модуляции и когерентное обнаружение/прием,
  - G.959.1: параметры оптических интерфейсов для сетей, включая когерентные системы,
  - G.872: архитектура оптических транспортных сетей OTN (Optical Transport Network),
  - G.652, G.655, G.654: характеристики одномодовых волокон SMF (Single Mode Fiber), оптимизированных для когерентной передачи.
- Преимущества когерентного обнаружения/приема:
  - высокая чувствительность: за счет использования на приемной стороне местного источника нормированного оптического излучения (лазера) в принятом с линии сигнале достигается более высокое оптическое отношение сигнал/шум (OSNR),
  - компенсация дисперсии: применение ЦСП устраняет необходимость установки на сети физических компенсаторов дисперсии DCF (Dispersion Compensation Fiber) на оптическом волокне, что снижает задержки и потери,
  - передача данных со скоростью от 100 до 800 Гбит/с и более: использование поляризационного мультиплексирования и форматов модуляции PSK/QAM позволяет поддерживать высокие скорости передачи данных на больших расстояниях.

Современные стандарты МСЭ-Т ориентированы на использование для открытых DWDM-линейных систем сменных (plug-and-play) оптических когерентных модулей-приемопередатчиков.

Реализация динамической маршрутизации потоков данных по каналам интегрированных пакетно-оптических транспортных сетей P-OTS

Для реализации динамической маршрутизации IP-трафика по оптическим каналам (длинам волн) волоконно-оптических систем передачи и передачи данных на большие расстояния со скоростью от 100 до 800 Гбит/с, 1600 Гбит/с и более применяются:

- технология IP over DWDM (IPoDWDM) или IP over OLS (IPoOLS), которая предусматривает:
  - устранение промежуточного оборудования (например, оптических транспондеров/мукспондеров) за счет установки сменных когерентных оптических линейных модулей-приемопередатчиков непосредственно в IP-маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы,
  - интеграцию функциональности OTN непосредственно в маршрутизатор, что позволяет использовать преимущества функциональности OTN без применения внешних транспондеров/мукспондеров,
  - снижение задержки сигнала и капитальных затрат, поскольку дает возможность IP-маршрутизатору напрямую управлять терабитными потоками данных;
- протокол GMPLS/ASON – позволяет в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т G.8080/Y.1304 разделять сеть на транспортную плоскость, плоскости управления и контроля, а также устанавливать правила:
  - взаимодействия маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов с узлами оптического линейного тракта OLS (Optical /Open Line System),
  - автоматизации при создании и внесении изменений, а также реализации защиты оптических каналов связи;
- многосвязные реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода/вывода MD ROADM (Multi-Degree Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer), которые обеспечивают:
  - дистанционную, без физического вмешательства персонала, перенастройку маршрутов оптических каналов (длин волн),
  - автоматизацию процессов и масштабируемость сети с использованием конфигураций CD (Colorless, Directionless) и CDC (Colorless, Directionless, Contentionless):
    - Colorless (без связи с длиной волны): любой линейный порт ROADM может быть настроен на любую длину волны,
    - Directionless (без связи с направлением передачи): любой оптический канал (длина волны) может быть направлен из узла ROADM в любую сторону (направление сети) без физической перекоммутации,
    - Contentionless (без каких-либо конфликтов): возможность распределения в многосвязном узле ROADM нескольких оптических каналов по разным направлениям с использованием для этих оптических каналов одинаковых длин волн.

CDC ROADM – третье поколение реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода/вывода, в котором устранены физические ограничения традиционных ROADM, что позволяет удаленно управлять оптическими каналами (длинами волн) без необходимости выезда технических специалистов на объект:

- форматы модуляции DP-mQAM (например, DP-DQPSK, DP-8QAM, DP-16QAM, DP-64QAM и т. п.) для линейного сигнала [8],
- цифровая обработка сигналов ЦСП/DSP (Digital Signal Processing) для компенсации хроматических и поляризационных дисперсионных искажений, а также для вероятностного формирования PCS (Probabilistic Constellation Shaping) звездной диаграммы сигнала с форматом модуляции DP-mQAM (МСЭ-Т G.691, G.957, G.959.1, G.Sup39) [9, 10],
- принципы когерентного обнаружения/приема (Coherent Optics) линейного сигнала для использования при передаче данных уровня интенсивности, а также фазы и поляризации оптического сигнала. При когерентном обнаружении/приеме принимаемый сигнал смешивается перед попаданием на фотодетектор с излучением местного лазера, исполняющего роль гетеродина,
- гибкая сетка частот (длин волн) FlexGrid (МСЭ-Т G.694.1) с возможностью выделения для каждого оптического канала диапазона частот (длин волн) с учетом требуемой скорости передачи данных.

В 2026–2030 годах интеллектуальная интеграция оптических транспортных сетей будет развиваться в направлениях:

- автоматизации управления сетью: применения функциональности GMPLS/ASON (МСЭ-Т G.8080/Y.1304; G.7715.2) и SDN (МСЭ-Т Y.3300) для автоматического создания, защиты и восстановления оптических каналов (длин волн) [11],
- увеличения символьной скорости передачи с понижением уровня DP-mQAM модуляции: для увеличения дальности связи по оптическим каналам (длин волн) с большой пропускной способностью, например, 100, 400, 800 Гбит/с и более [12],
- поддержки гибкой сетки частот FlexGrid для оптических DWDM каналов (МСЭ-Т G.694.1): формирования в одном оптическом волокне оптических каналов (длин волн) с увеличенной символьной скоростью и большой пропускной способностью, например, 100, 400, 800 Гбит/с и более,
- внедрения гибких сетевых узлов MD-ROADM (МСЭ-Т G.672): гибкого управления маршрутами оптических каналов (длинами волн) транспортной сети OTN/DWDM,
- увеличения дальности передачи: использования вероятностного формирования PCS (Probabilistic Constellation Shaping) звездной диаграммы сигнала с форматом модуляции DP-mQAM (МСЭ-Т G.691, G.957, G.959.1, G.Sup39) [13, 14],
- интеграции с сетями мобильной связи 5G/6G: обеспечения низкой задержки и высокой динамичности при предоставлении разнообразных услуг.

Решения по динамической маршрутизации IP-трафика предлагают такие производители оборудования, как Ciena, Nokia, Huawei, Cisco, и др.

Сетевые технологии IPoOT (IP over Optical Transport) и IPoDWDM (IP over Dense Wavelength Division Multiplexing)/P-OTS

Методы передачи IP-трафика между точками присутствия PoP (Point of Presence) и региональными центрами RC (Regional Center) с ЦОДами можно классифицировать так [15]:

- IPoDWDM/IPoOLS/P-OTS с соединением маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов по упрощенной волоконно-оптической линейной системе OLS (Optical Line System),
- IPoOT с соединением маршрутизаторов (уровень IP/MPLS) и/или пакетных коммутаторов поверх OTN/DWDM волоконно-оптической транспортной системы передачи (ВОСП).

Долгие годы велся спор о том, какая технология – IPoDWDM/IPoOLS/P-OTS или IPoOT – более перспективна. Однако практика показала, что в равной мере следует рассматривать обе технологии.

Отличия между решениями IPoDWDM/IPoOLS/P-OTS и IPoOT заключаются в следующем:

- IPoDWDM/IPoOLS/P-OTS: маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы, работая "через DWDM", могут обеспечивать связь на значительно более дальние расстояния по сравнению с ситуацией, когда они осуществляют передачу по "серой", не настроенной на определенную длину волны оптического излучения, клиентской, оптике. Упрощение архитектуры сети связано с тем, что отправление потоков данных от маршрутизатора и/или пакетного коммутатора по оптическому каналу (длине волны) производится напрямую, без использования блоков транспондеров/мукспондеров OTN/DWDM ВОСП. Вместо них в IP-маршрутизатор или пакетный коммутатор устанавливаются малогабаритные и энергоэффективные сменные линейные оптические когерентные модули-приемопередатчики, которые далее напрямую подключаются к мультиплексору/демультиплексору оптических каналов (длин волн) OTN/DWDM

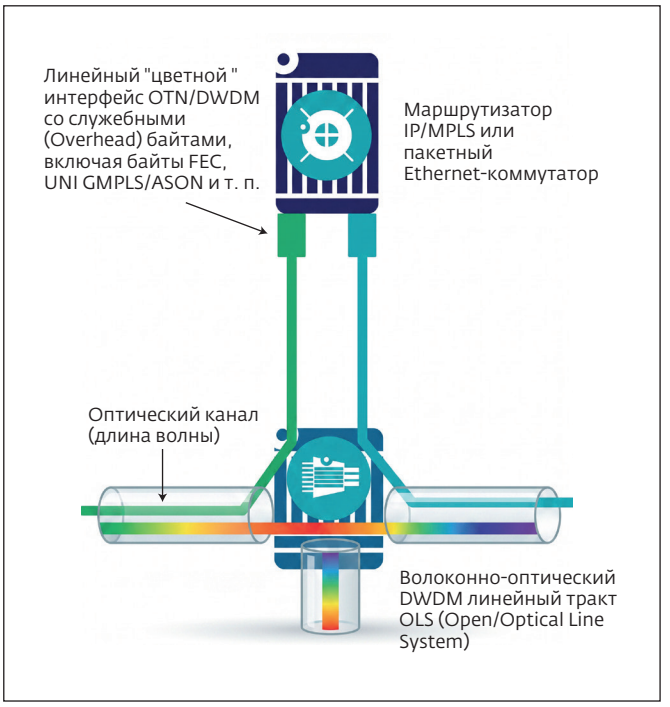


Рис.1. Маршрутизатор с интегрированными транспондерами

оптической линейной системы OLS (Optical/Open Line System). Решение IPoDWDM с интегрированными в маршрутизаторы сменными оптическими когерентными DWDM модулями-приемопередатчиками (вместо транспондеров/мукспондеров) представлено на рис.1,

- IPoOT: предусматривается преобразование сигналов от маршрутизатора и/или пакетного коммутатора в цифровой сигнал в формате OTN и оптический сигнал DWDM на нужной длине волны в отдельном оборудовании в виде транспондеров/мукспондеров. В этом случае маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы подключаются к полке с транспондерами/мукспондерами волоконно-оптической транспортной сети с использованием "серых" приемопередатчиков [16].

Решение IPoOT с добавлением в агрегирующих узлах сети полок расширения с транспондерами/мукспондерами OES (Optical Extension Shelves) экономически привлекательно в тех случаях, когда требуется большое количество высокоскоростных линейных портов в сочетании с большой дальностью связи. В интерфейсе подключения OES обычно предусматривается стандартизованный функционал управления GMPLS UNI. Соединения маршрутизаторов с волоконно-оптической транспортной системой (рис.2) осуществляются с использованием обычных волоконно-оптических патчкордов (коммутационных шнуров).

В пакетно-оптических транспортных системах IPoDWDM/IPoOLS/P-OTS (Packet-Optical Transport System) логически интегрированное решение получается благодаря управляющему интерфейсу (control interface) GMPLS UNI между маршрутизатором и/или пакетным

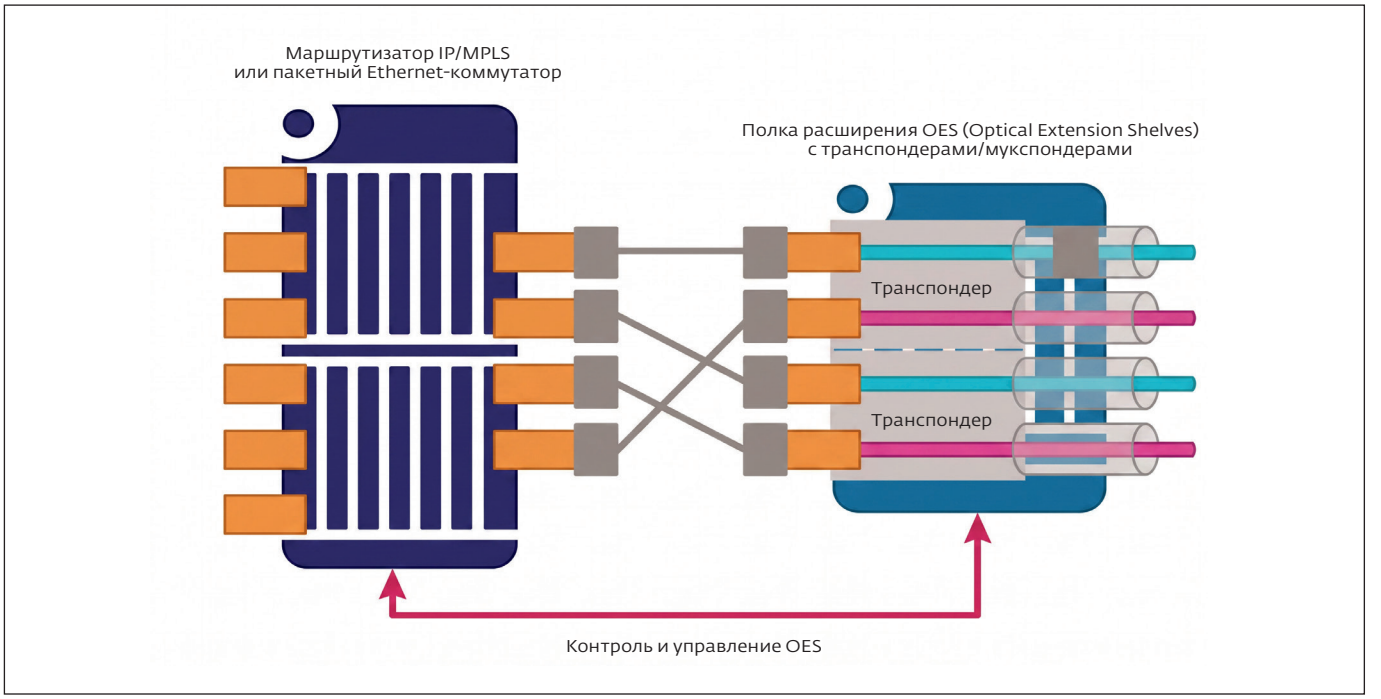


Рис.2. Расширение маршрутизаторов полками OES (Optical Extension Shelves) с транспондерами/мукспондерами

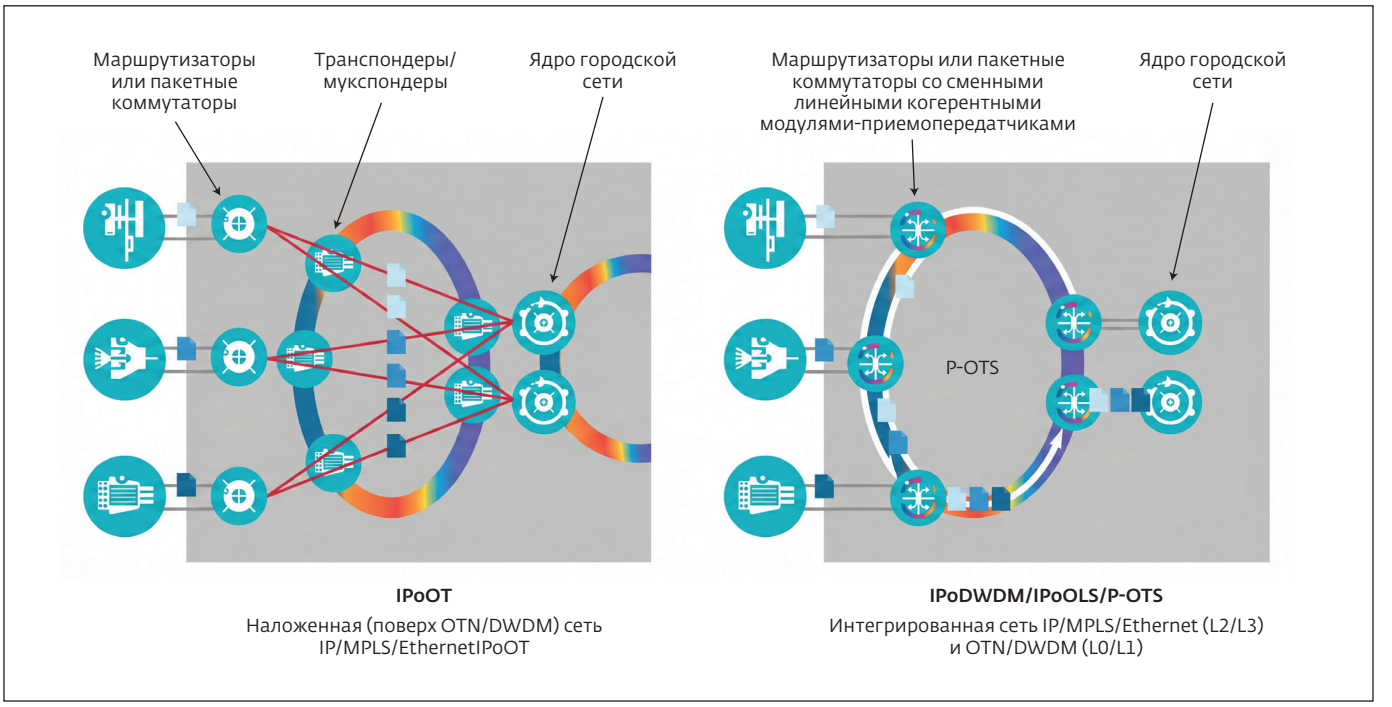


Рис.3. Сравнение решений IPoOT и IPoDWDM/P-OTS

коммутатором и ВОСП. Через этот интерфейс передается также служебная информация, которая не может быть предоставлена по коммуникационным каналам, например, инвентаризационные данные и предупреждения. Возможности ВОСП дополняются, как показано на рис.3, функциональностью маршрутизатора и/или пакетного коммутатора, включая функции Ethernet, транспортного MPLS-TP, а также механизмы обеспечения качества обслуживания QoS.

Системы IPoOT предоставляют следующие преимущества:

- снижение требований к промежуточным маршрутизаторам за счет их "обхода" по оптическим каналам OTN/DWDM ВОСП, что повышает надежность и уменьшает расходы на сеть и ее обслуживание,
- количество узлов, через которые может проходить оптический канал (одна длина волны) для "обхода" промежуточных маршрутизаторов практически не ограничено,
- уменьшается количество необходимых оптических каналов (длин волн), а в некоторых случаях и оптических волокон, благодаря статистическому мультиплексированию пакетного трафика на каждом узле, оркестратор SDN координирует предоставление IP/MPLS/Ethernet услуги поверх гибкой оптической OTN/DWDM ВОСП.

В конфигурации IPoOT для размещения (инкапсуляции) IP-данных в полезной нагрузке структуры сигнала OTN в оптических каналах (длинах волн), а также для передачи этих сигналов по ВОСП с уровнем выходной мощности до 0 дБм (1 мВт) используются транспондеры/мультиплексоры, которые ориентированы:

- на частные решения для оптических каналов большой протяженности (длин волн) с пропускной способностью в перспективе до 1,6 Тбит/с и более,
- стандартизованные сменные оптические когерентные модули-приемопередатчики для каналов с пропускной способностью от 100 до 800G Гбит/с для установки непосредственно в транспондеры/мукспондеры. Выходные потоки данных от нескольких маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов с более низкими скоростями (например, Nx100GbE или Mx400GbE) можно объединить в мукспондерах для передачи по одному оптическому каналу (одной длине волны) с пропускной способностью до 800 Гбит/с, 1,6 Тбит/с и более,
- динамическое восстановление соединения (оптического канала) при обрывах оптического волокна с использованием возможностей GMPLS/ASON при наличии функциональности MB ROADM CDC в узлах сети,
- предоставление партнерам расширенных функций по совместному использованию спектра DWDM

с поддержкой длин волн, поступающих от внешних устройств Alien Wavelength, не принадлежащих оператору сети [17],
- шифрование данных на уровне L1/OTN,
- использование лучших в своем классе технологий оптической передачи, предлагаемых разными производителями, причем без каких-либо модификаций маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов,
- добавление кросс-коммутаторов OTN (с переключением каналов на уровне оптических блоков данных ODUk) для достижения дополнительной гибкости в управлении коммутацией трафика данных между оптическими каналами (длинами волн) ВОСП.

Перспектива использования искусственного интеллекта на интегрированных пакетно-оптических транспортных сетях

Перспектива заключается в создании когнитивных оптических сетей, способных к самоорганизации, самооптимизации и самовосстановлению (Self-Organizing Networks). В сетях с динамической маршрутизацией искусственный интеллект обеспечит функционирование сетевых уровней IP/Ethernet и OTN/DWDM как единого целого с переходом к автономным сетям с управлением по намерениям (Intent-Based Networking). В таких сетях оператор сможет задавать цель (например, "задержка <1 мс"), а ИИ обеспечит ее достижение.

Основные направления использования ИИ:
- динамическая маршрутизация и управление трафиком: алгоритмы ИИ способны мгновенно анализировать состояние сети и перемаршрутизировать потоки данных в режиме реального времени, оптимизируя использование длины волны и предотвращая перегрузки,
- прогнозирование и планирование сети: ИИ позволяет прогнозировать нагрузку (кратко- и долгосрочно), что помогает оптимизировать развитие инфраструктуры и предотвращать возникновение "узких" мест,
- автономное обслуживание (Intent-Based Networking): переход от ручного управления к системам, где оператор задает цель (например, "обеспечить задержку <1 мс"), а ИИ самостоятельно выполняет поставленную задачу,
- интеллектуальный мониторинг и безопасность O&M (Operation and Maintenance): ИИ обнаруживает аномалии, диагностирует физические повреждения волокна и предсказывает сбои до того, как они произойдут.

Роль ИИ в развитии интегрированных пакетно-оптических транспортных сетей высокой пропускной способности заключается в повышении надежности, гибкости и снижении эксплуатационных расходов за счет автоматизации, оптимизации и интеллектуального управления сетевыми ресурсами:
- автоматическое управление трафиком: ИИ может быть использован для анализа нагрузки и приоритезации потоков данных в реальном времени, динамического перераспределения ресурсов между IP- и волоконно-оптическим уровнями сети,
- прогнозное обслуживание и устранение неисправностей: МО (машинное обучение)/ML (Machine Learning) позволит по результатам анализа телеметрии, получаемой с оптических датчиков, IP-маршрутизаторов и пакетных коммутаторов, обнаруживать аномалии и предотвращать сбои до того, как они повлияют на работу сети,
- оптимизация характеристик: ИИ поможет находить оптимальные маршруты передачи данных с учетом таких параметров оптической сети, как задержки и затухание, что критично для высокоскоростных соединений.

Использование ИИ при динамической маршрутизации (Dynamic Routing) в интегрированных пакетно-оптических сетях даст возможность:
- оптимизировать выбор маршрута соединения: алгоритмы машинного обучения (ML) выбирают маршрут не только по принципу кратчайшего расстояния, но и с учетом работоспособности, доступности и характеристик оптического канала,
- адаптивно изменять длину волны и формат модуляции: автоматически настраивать параметры передатчиков в зависимости от динамики нагрузки и дальности связи,
- использовать когнитивную маршрутизацию: технологию "автономной распределенной маршрутизации", при которой для обеспечения наилучшего QoS применяется переключение между централизованным (например, SDN/NMS (Network Management System) и распределенным (например, GMPLS/ASON) управлением.

В 2026–2030 годах предполагается начать использовать ИИ для управления интегрированными энергоэффективными пакетно-оптическими транспортными сетями высокой пропускной способности P-OTS с интеллектуальной маршрутизацией потоков данных и поддержкой соединений с пропускной способностью 800, 1600 Гбит/с и более.

БОЛЬШАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ НЕДЕЛЯ ИНДИЯ

ИННОПРОМ

9–11 СЕНТЯБРЯ

НЬЮ-ДЕЛИ | BHARAT MANDAPAM

ИННОПРОМ. ИНДИЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА

10 000 м²
выставочная площадь

200+
экспонентов и соэкспонентов

10 000+
посетителей

10+
мероприятий деловой программы

ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗВИТИЯ ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Выбрать формат участия

12+ РЕКЛАМА | ООО «ФОРМИКА ИВЕНТ», ИНН 7709889632

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/bpaphrarx7a89we9in5xc 7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf.
4. Обзор телекоммуникационных протоколов: MPLS. [Электронный ресурс] URL: https://skomplekt.com/tools/3811773.html.
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. Часть 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 // 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. Vol. 37. № 6. March 15, 2019. [Электронный ресурс] URL: https://opg.optica.org/directpdfaccess/f8f74a1a-e09e-4b56-829873e6fbf4c 61c_408282/jlt-37-6-1590.pdf?da=1&id=408282&seq=0&mobile=no (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/949/1p 8fakl7oisl0djbkufwvr1a9srb8gf2/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. Часть 1. Традиционные и гибридные форматы квадратурной модуляции // 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/archive/2015/04; 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).



МЕЖДУНАРОДНЫЙ САЛОН

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ АРКТИКИ

24–26 НОЯБРЯ 2026

МОСКВА, ВДНХ

ПАВИЛЬОН №20 «ФОРУМ»

ОРГАНИЗАТОР

БИЗОН ОБЪЕДИНЕНИЕ ВЫСТАВОЧНЫХ КОМПАНИЙ

SECURITYARCTIC.RU