Интегрированные пакетно-оптические транспортные сети большой пропускной способности

Часть 3. Варианты управления потоками данных и реализации сменных модулей приемопередатчиков

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2026.138.6.50.59

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 управления (маршрутизации) потоками данных и реализации сменных модулей приемопередатчиков. Четвертая часть цикла посвящена стандартизации и эволюции решений для интегрированных пакетно-оптических транспортных сетей большой пропускной способности.

Маршрутизация потоков с непосредственным подключением (Direct Connect) маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов к волоконно-оптической сети

В решении IPoDWDM, в варианте с непосредственным подключением DC (Direct Connect), маршрутизаторы соединяются напрямую друг с другом при помощи сменных оптических когерентных модулей приемопередатчиков в конструктивном исполнении (Form Factor) QSFP-DD или OSFP [15]. В этом случае циклы (кадры) OTN не используются, максимальный уровень мощности оптического излучения на передающей стороне составляет –10 дБм (0,1 мВт), а дальность связи не превышает 80–120 км.

Сеть может быть спроектирована по топологии "точка-точка" (point-to-point), "звезда" (Star), "кольцо" (Ring) или "ячеистая" (Mesh). Во всех конфигурациях трафик между региональными центрами RC (Regional Center), например RC1 и RC2 на рис.5, проходит через

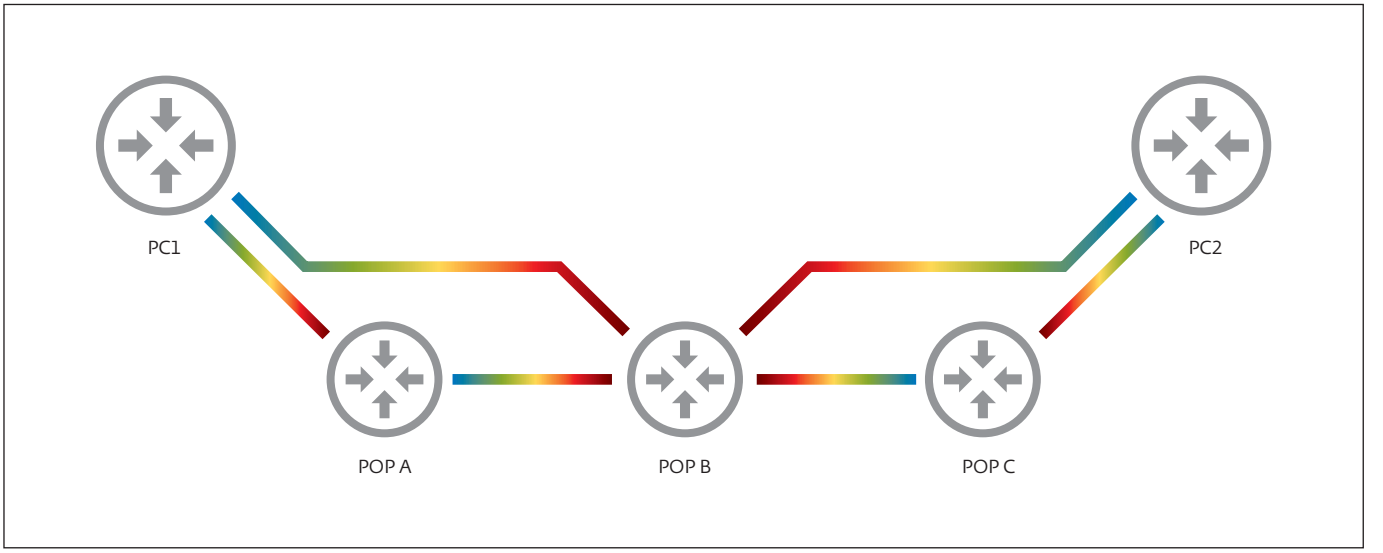


Рис.5. Передача IP-трафика по сети IPoDWDM с непосредственным соединением маршрутизаторов DC и прохождением трафика данных через все промежуточные маршрутизаторы [15]

промежуточные маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы в точках присутствия PoP (Point of Presence). На рис.5 показаны точки присутствия PoPA, PoPB и PoPC. В случае обрыва оптического волокна восстановление соединения происходит только на уровне IP-маршрутизации.

Маршрутизация потоков данных по простой волоконно-оптической линейной системе DWDM OLS (Simple OLS)

Решение IPoDWDM в варианте IP over Simple OLS отличается тем, что данные маршрутизируются

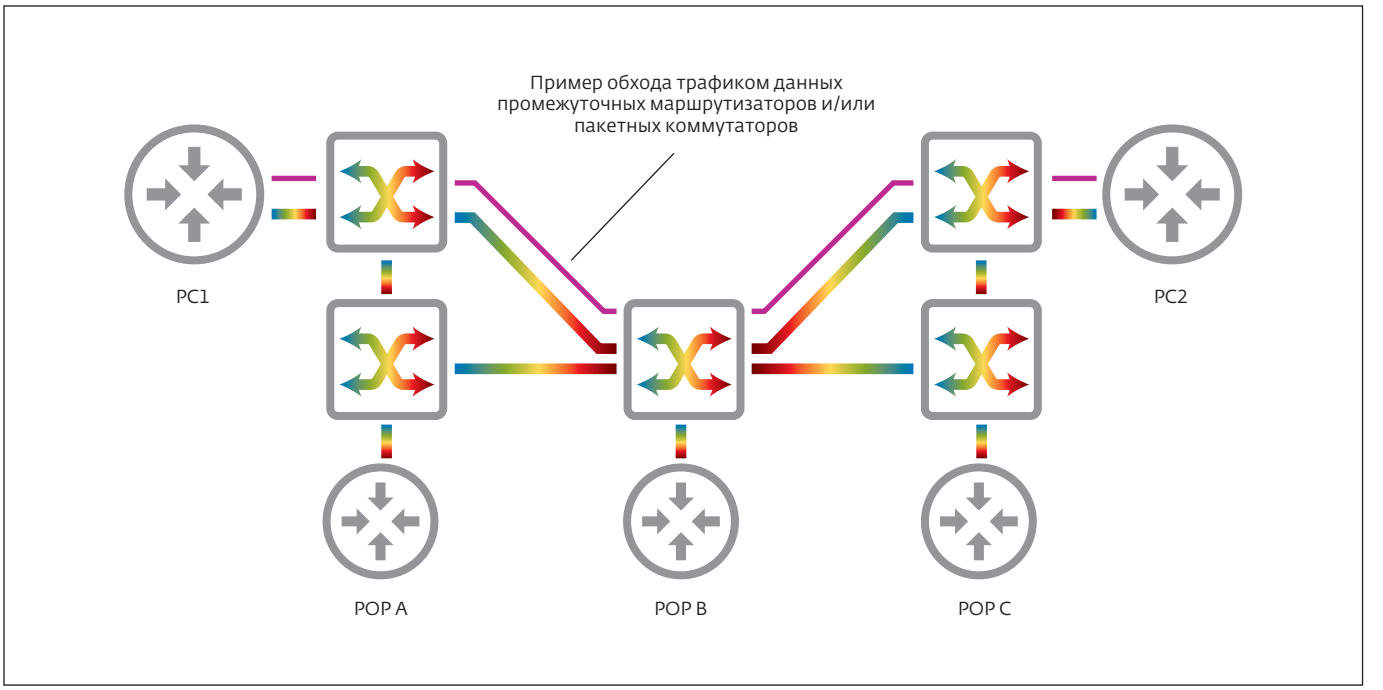


Рис.6. Передача IP-трафика по сети IPoDWDM с простой оптической линейной системой OLS (Simple OLS) и обходом трафиком данных промежуточных маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов [15]

по каналам (длинам волн) DWDM оптической линейной системы OLS (Optical Line System) с узлами ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) [15]. Понятие простой (Simple) или открытой (Disaggregated) OLS означает разделение ("дезагрегацию") пассивного/активного оптического оборудования линии и передающих терминалов (например, маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов). Такая простая архитектура позволяет операторам использовать стандартные линейные системы от одного производителя, а маршрутизаторы и/или пакетные коммутаторы – от других, избегая тем самым жесткой привязки к одному поставщику оборудования.

Система Simple OLS может включать необходимые средства усиления оптического сигнала, что позволяет реализовать обход (passthrough) промежуточных маршрутизаторов и/или пакетных коммутаторов и при этом снизить требования к их пропускной способности и стоимости (рис.6).

Интегрированная (конвергентная) плоскость управления пакетно-оптической транспортной сетью высокой пропускной способности

Для оптической транспортной сети и IP-сети традиционно использовались разные системы управления и отдельные команды специалистов. В концепции IPoDWDM интеграция плоскости управления IP-маршрутизацией и волоконно-оптической транспортной сети (рис.7) позволяет:

- упростить и оптимизировать сложные операции,
- снизить вероятность человеческой ошибки,
- улучшить качество обслуживания и повысить эффективность использования ресурсов.

Интегрированная (конвергентная) плоскость распределенного управления пакетно-оптической транспортной сетью высокой пропускной способности

Важным шагом по оптимизации доставки пакетов данных в интегрированной (конвергентной) многоуровневой транспортной сети является использование плоскости распределенного управления (Control Plane) [16] для предоставления услуг поверх облачной сетевой инфраструктуры с технологиями:

- **GMPLS** (Generalized Multi-Protocol Label Switching) в соответствии с решениями RFC (Request for Comment) инженерного совета Интернета IETF (Internet Engineering Task Force) RFC 3945 & RFC 3471 & RFC 3473 & RFC 4208,
- **ASON** (Automatically Switched Optical Network) в соответствии с МСЭ-Т G.8080 & G.7713,
- **OSPF TE** (Open Shortest Path First Traffic Engineering) в соответствии с IETF RFC 5787 / RFC 6827/ RFC 3630. МСЭ-Т в документах G.7715.1/Y.1706.1 ссылается на базовые спецификации IETF (например, RFC 3630) при использовании OSPF-TE для управления оптическими и цифровыми каналами связи в таких архитектурах транспортных сетей, как GMPLS и ASON,
- **RSVP-TE** (Resource Reservation Protocol with Traffic Engineering) в соответствии с IETF RFC 4974 и RFC 3474, а также Distributed Call and Connection Management: Signalling mechanism using GMPLS RSVP-TE от МСЭ-Т (G.7713.2 / Y.1704.2),
- **IS-IS TE** (Intermediate System-to-Intermediate System Traffic Engineering) – расширение протокола маршрутизации IS-IS для поддержки инженерии трафика TE (Traffic Engineering) в транспортных, пакетных и оптических сетях (включая архитектуры ASON/GMPLS и MPLS-TP) в соответствии с IETF RFC 5305/RFC 6119, на которые ссылается МСЭ-Т при описании сетевой архитектуры в документах серии G и Y.

Механизмы автоматически коммутируемой оптической сети ASON основаны на выделенной интеллектуальной плоскости управления (Control Plane), которая отделена от плоскости передачи данных. Благодаря использованию интерфейса GMPLS UNI (User-Network Interface) на границе между маршрутизаторами и транспортной сетью, IP-маршрутизаторы могут самостоятельно передавать в нижележащую транспортную инфраструктуру запросы о необходимых ресурсах для передачи трафика (рис.8). При этом не требуется привлечения обслуживающего персонала, который обычно формирует такие запросы через систему управления сетью. В свою очередь, транспортная сеть через интерфейс GMPLS UNI может информировать IP-маршрутизаторы о различных событиях, что позволит им быть "в курсе" происходящего на уровне транспорта и более эффективно использовать нижележащие ресурсы.

Благодаря функциональности GMPLS/ASON появляется возможность динамически прокладывать в транспортной сети маршрут передачи данных или изменять его на основе сведений о загрузке сети и/или параметров соглашения об уровне предоставления услуг SLA (Service Level Agreement) для обхода аварийных участков или для направления трафика по оптимальному маршруту. Через интерфейс GMPLS UNI маршрутизаторы могут динамически запрашивать соединения в транспортной сети, причем с обеспечением отказоустойчивости за счет поддержки различных вариантов защиты.

Схемы защиты и восстановления связи могут действовать на уровне волоконно-оптического сегмента сети, например между интерфейсами UNI-N (User-Network

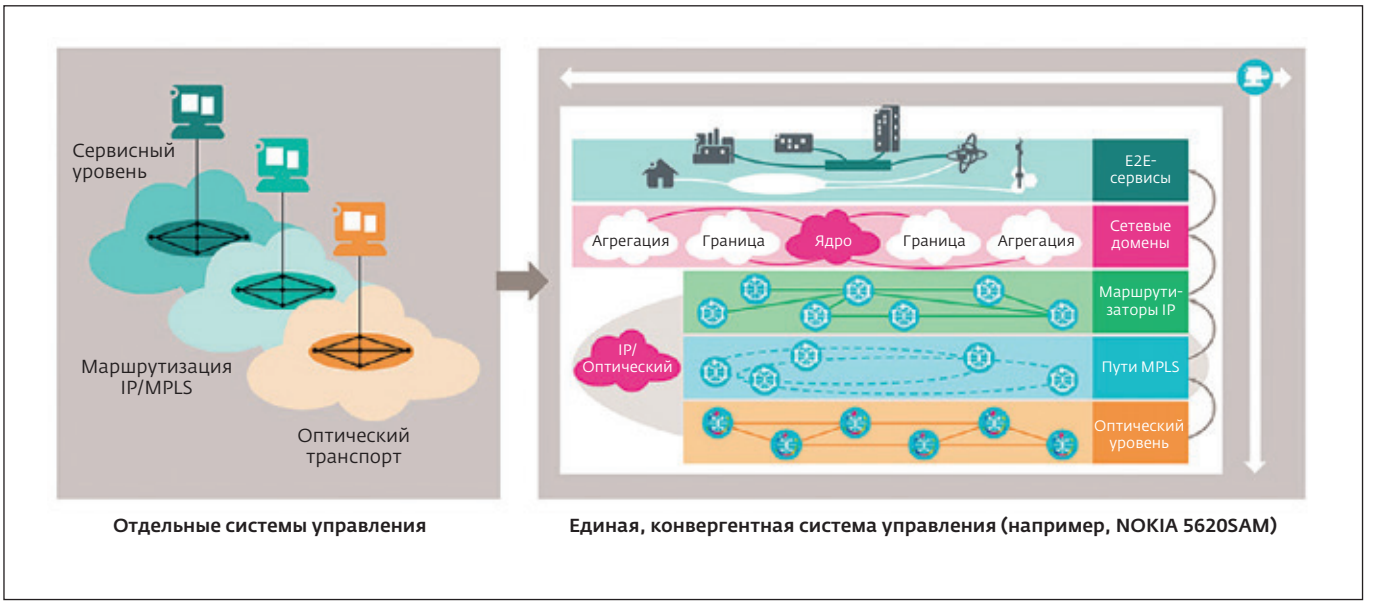


Рис.7. Интегрированные решения по сетевому управлению позволяют перейти от фрагментарной работы с отдельными сетевыми доменами к кросс-доменному управлению [16]

Interface – Network side) или UNI-C (User-Network Interface-Client или Customer-side) либо их комбинации. Чтобы оценить преимущества гибких схем защиты соединений, реализуемых с помощью GMPLS/ASON, можно сравнить их с традиционной для волоконно-оптического транспорта схемой SNCP 1+1 (Sub-Network Connection Protection), при которой сигнал дублируется на передающей стороне и передается по двум разным путям, а на принимающей стороне выбирается лучший вариант.

Для обслуживания IP-трафика схема SNCP1+1 зачастую оказывается неэффективной по следующим причинам:

- заранее определяется резервный маршрут соединений, что не позволяет оперативно учесть точное

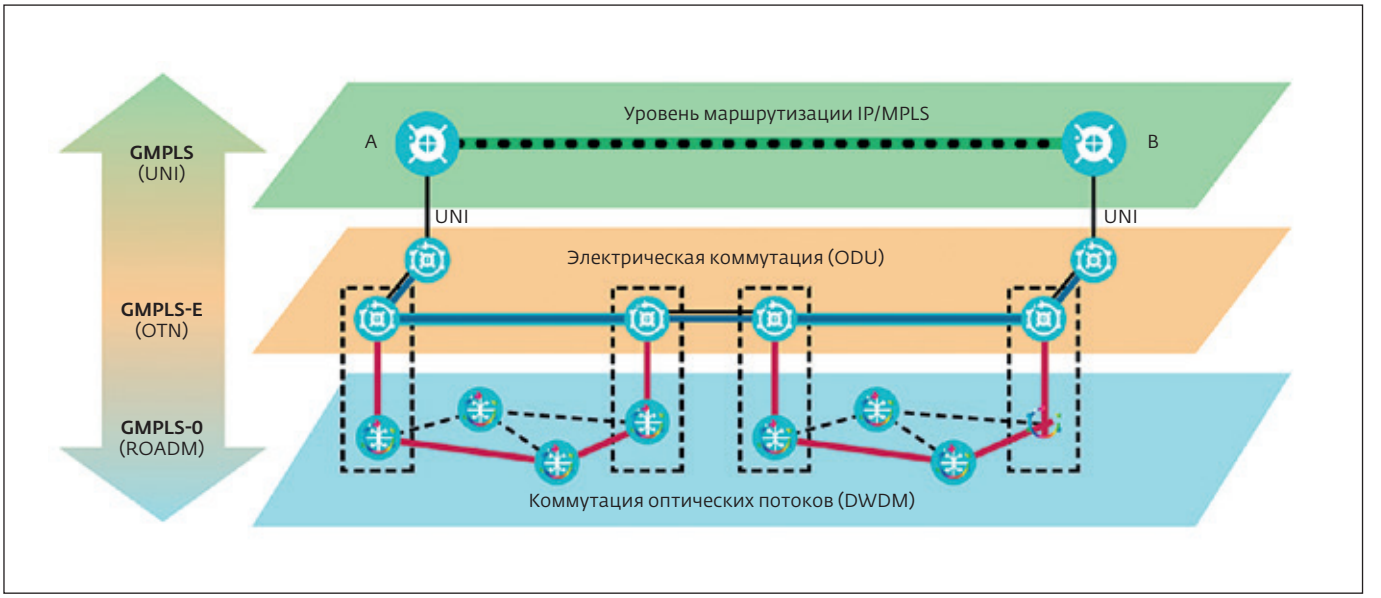


Рис. 8. Функциональность GMPLS UNI обеспечивает тесное взаимодействие между уровнями маршрутизации и волоконно-оптической транспортной сети [16]

место аварии для организации местного обхода аварийного участка сети с учетом его фактического расположения,
- используется лишь один резервный путь, что позволит восстановить связь только в случае одного сбоя (или аварии).

Технология GMPLS/ASON дает возможность защититься от множественных отказов, поскольку в этом случае могут быть использованы разнообразные альтернативные маршруты соединений. Вместо резервирования выделенного соединения по схеме SNCP 1+1 в технологии GNPLS/ASON можно задействовать более экономные схемы динамической перемаршрутизации:
- N+1 – метод резервирования, при котором N рабочих оптических каналов или путей защищаются с помощью одного общего резервного ресурса. Этот резервный тракт, зачастую находящийся в "горячем" или "теплом" резерве, готов принять нагрузку любого из N каналов,
- N:1 – метод резервирования, который применяется в интеллектуальных оптических сетях, например, с функциональностью GMPLS/ASON. При обрыве оптического волокна или конкретной длины волны система не просто переключает порт, а вычисляет и динамически прокладывает новый, альтернативный, маршрут по другим свободным длинам волн или оптическим волокнам в сети.

Снижение уровня избыточности резервирования при защите трафика с использованием технологии GMPLS/ASON позволяет оставить больше сетевых ресурсов для передачи данных, что дает возможность оператору получить дополнительный доход. Для наиболее критичного трафика можно задействовать, например, схемы быстрого переключения на предварительно зарезервированный путь, а для менее критичного трафика экономически более привлекательны схемы динамического восстановления.

Интегрированная (конвергентная) плоскость централизованного управления пакетно-оптической транспортной сетью высокой пропускной способности

Программно-определяемые сети SDN (Software Defined Networks) и автоматизированные коммутируемые оптические сети ASON соответствуют идее разделения уровней управления и передачи данных, но ASON является узкоспециализированным стандартом для транспортных сетей связи, тогда как SDN – универсальная ИТ-концепция с полностью централизованным программным контроллером для ЦОДов и корпоративных сетей.

Преимущества программно-определяемых сетей SDN (Software Defined Networks) состоят в том, что в них создается мощный открытый уровень абстракции, через который различные приложения могут сообщить о своих специфических потребностях непосредственно системе управления сетевой инфраструктурой и сетевыми элементами NE (Nework Elements). Интеллект сети вынесен в единый внешний программный контроллер – "мозг".

В этом случае физические сетевые устройства выполняют только роль "труб" для пересылки пакетов по командам контроллера. Контроллер SDN через так называемые северные API (Application Programming Interface) получает "пожелания" приложений, а затем вниз, через южные интерфейсы API, передает сетевой инфраструктуре инструкции для обеспечения надлежащего обслуживания трафика этих приложений.

Основной южный интерфейс API – стандартизированный протокол OpenFlow, который, в частности, позволяет настраивать списки контроля доступа ACL (Access Control List) и управлять потоками трафика на маршрутизаторах. Однако это далеко не единственный протокол SDN: при использовании интегрированной (конвергентной) плоскости централизованного управления для конфигурирования различных сетевых устройств в соответствии с IETF RFC 6241 рекомендован стандартизированный протокол управления NETCONF (Network Configuration Protocol).

Дальнейшая эволюция классических программно-определяемых сетей связана с переходом к Intent-based SDN (или Intent-Based Networking, IBN), то есть к реагирующим на намерения SDN-сетям, где администратор задает лишь бизнес-цель ("намерение"), а специальный контроллер, обеспеченный поддержкой искусственного интеллекта AI/ИИ и машинного обучения ML/МО, автоматически перенастраивает, оптимизирует и проверяет всю сетевую инфраструктуру. Классический SDN требует настройки каждого правила вручную через код или интерфейс. Intent-Based Networking подход меняет задачу [20]:
- перевод цели: система принимает запрос на человеческом или бизнес-языке (например, "разрешить трафик для CRM" или "изобразить уровень безопасности X"),
- автоматический перевод: контроллер сам решает, какие параметры нужно изменить на каждом маршрутизаторе или коммутаторе,
- постоянный контроль: сеть сама следит за тем, чтобы реальное состояние не расходилось с заданным намерением.

Сменные клиентские и линейные DWDM оптические модули приемопередатчиков

Клиентские сменные модули (Client) служат для стыковки оборудования с пользовательскими сетями и короткими линиями внутри ЦОДов, преимущественно по технологии Ethernet:

- подключаются к маршрутизаторам, коммутаторам или серверам,
- обеспечивают преобразование электрических сигналов в оптические и наоборот,
- выпускаются в стандартизированных корпусах (форм-факторах) с функцией "горячей замены" (hot-pluggable), то есть замены без отключения электропитания,
- обеспечивают формирование и передачу потока данных по оптическому волокну с IM/DD или Coherent Lite обнаружением сигнала на приемной стороне,
- работают с "короткими" интерфейсами, например SR, LR, FR,
- рассчитаны на короткие дистанции: от сотен метров до 10–40 км.

В линейных сменных модулях (Line) как важнейших компонентах концепции IPoDWDM:

- используются алгоритмы прямого исправления ошибок FEC (Forward Error Correction) и многопозиционные схемы модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation),
- обеспечивается компенсация дисперсионных искажений.

В зависимости от скорости передачи данных и требуемой дальности связи в этих модулях применяются методы прямого IM/DD (Intensity Modulation with Direct Detection) или когерентного обнаружения/приема потока данных [7, 21]. Сменные линейные модули приемопередатчиков:

- подключаются к оконечному оборудованию со стороны DWDM ВОСП,
- обеспечивают преобразование электрических сигналов в оптические в диапазонах длин волн оптического излучения C или L и наоборот,
- выпускаются в стандартизированных корпусах (форм-факторах) с функцией "горячей замены" (hot-pluggable), то есть замены без отключения электропитания,
- обеспечивают формирование и передачу потока данных по оптическим каналам (длинам волн) DWDM ВОСП с когерентным обнаружением сигнала на приемной стороне,
- обеспечивают связь на расстояния от 80 до 1000 и более километров без O-E-O-преобразования с или без использования оптических усилителей.

Варианты конструктивного исполнения сменных оптических модулей приемопередатчиков представлены ниже.

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении SFP/SFP+ или XFP

Сменные модули для передачи данных по каналу с пропускной способностью 1,25 и 10 Гбит/с с традиционным прямым обнаружением/приемом IM/DD применялись в корпоративных и городских сетях с дальностью связи до 80–120 км, выпускались в конструктивном исполнении SFP/SFP+ (Small Form-factor Pluggable) [22, 23].

Для передачи данных по каналу с пропускной способностью 10 Гбит/с и прямым обнаружением/приемом IM/DD использовались модули XFP (10-Gigabit Small Form-factor Pluggable). Буква "X" в названии означает римскую цифру "10", указывая на первоначальную ориентацию модулей на каналы с пропускной способностью 10 Гбит/с. Эти модули выпускались в более крупном корпусе (крупнее SFP+) и использовались в оборудовании более ранних модификаций.

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении CFP/CFP2/CFP4/CFP8

Для передачи данных на сетях DCi взаимодействия ЦОДов по каналам с пропускной способностью 100/200/400/800 Гбит/с использовались сменные модули CFP / CFP2 / CFP4 /CFP8 (100-Gigabit Small Form-factor Pluggable). Буква "C" в наименовании означает римскую цифру 100, указывая на первоначальную ориентацию этих модулей на каналы с пропускной способностью 100 Гбит/с. Модификации CFP2, CFP4 и CPF8 обеспечивают повышенную плотность портов за счет уменьшения размера модулей. В модулях CFP поддерживается функциональность DDM/DOM (Digital Diagnostic Monitoring / Digital Optical Monitoring), необходимая для отслеживания параметров модуля (температуры, уровня интенсивности излучения лазера, выходного сигнала) в реальном времени.

Дальность связи для клиентских прямых подключений IM/DD:

- SR Multimode (Short Reach): короткие расстояния до 100–500 м по многомодовому волокну (например, 400G SR16/SR8),
- DR/FR (Data Center Reach / Functional Reach, SMF): средние расстояния от 500 м до 2 км по одномодовому волокну (например, 400G DR4/FR4),

- LR (Long Reach): большие расстояния до 10 км по одномодовому волокну (например, 400G LR8),
- ER/ZR: сверхбольшие расстояния до 40 км и более по одномодовому волокну (например, 400G ER4/ZR).

Дальность связи для линейных подключений с использованием когерентного обнаружения/приема зависит от типа модуля, используемого формата модуляции (например, DP-QPSK или DP-16QAM) и наличия в линии оптических усилителей EDFA/Raman:

- магистральные протяженные сети (Long-Haul): дальность связи по оптическим каналам с пропускной способностью 400 Гбит/с составляет от 1000 до 2000 км и более,
- региональные/городские сети (Metro/Regional): дальность связи по оптическим каналам с пропускной способностью 800 Гбит/с может составлять несколько сотен километров.

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении QSFP28

Для клиентских подключений на короткие расстояния с пропускной способностью 100 Гбит/с и с прямым обнаружением (приемом) IM/DD, компонентными сигналами с пропускной способностью 28 Гбит/с (4×28G) и форматом модуляции PAM4 предназначено компактное конструктивное исполнение QSFP28 (Quad Small Form-factor Pluggable 28) [24].

Такое же компактное конструктивное исполнение QSFP28 используется для линейных интерфейсов в модификации DCO (Digital Coherent Optic) с возможностью перестройки по длинам волн в полосе C-band, когерентным обнаружением (приемом) и дальностью связи до 80–120 км без оптических усилителей и до 300 км с ними. Решения DCO (Digital Coherent Optics) – это сменные оптические модули приемопередатчиков со встроенным чипом цифрового сигнального процессора ЦСП/DSP (Digital Signal Processor), когерентным обнаружением (приемом) и лазером. Такие решения в современной оптической связи ориентированы на скорости передачи данных в оптическом канале (длине волны) от 100 Гбит/с до 1,2–1,6 Тбит/с.

Примеры выпускаемых промышленностью сменных линейных модулей DCO в конструктивном исполнении QSFP28: Coherent 100G ZR QSFP28-DCO, Ciena 100ZR QSFP28 Coherent Transceiver, Nokia 100G ZR QSFP28-DCO (QDCO1) с цифровым сигнальным процессором ЦСП NOKIA PSE-C, FS.com 100G ZR QSFP28-DCO, AscentOptics 100G QSFP28, Qtech 100G Coherent (российские когерентные модули, включая варианты QSFP28/CFP2).

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении QSFP56

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении QSFP56 (Quad Small Form-factor Pluggable 56) с прямым обнаружением (приемом) IM/DD, компонентными сигналами с пропускной способностью 56 Гбит/с (4×56G) и форматом модуляции PAM4 предназначены для клиентских подключений на короткие расстояния с пропускной способностью 200 Гбит/с.

Ниже представлены примеры сменных модулей приемопередатчиков QSFP56 200G (SR4, DR4, FR4, LR4) [25], используемых в ЦОДах:

- QSFP56 SR4 (Short Reach): 200GBASE-SR4, многомодовое волокно (MMF), 4 компонентных сигнала по 56 Гбит/с (850 нм) каждый, формат модуляции PAM4, соединитель MPO/MTP-12 APC, дальность до 70 м по волокну OM3 или до 100 м по волокну OM4/OM5,
- QSFP56 DR4 (Data Center Reach): одномодовое волокно (SMF), 4 компонентных сигнала по 56 Гбит/с (1310 нм) каждый, формат модуляции PAM4, соединитель MPO/MTP-12 APC, дальность до 500 м. Это отличное решение для обновления оптических каналов сети со 100G (QSFP28) до 200G (QSFP56) без замены кабельной системы,
- QSFP56 FR4 (Functional Reach): одномодовое волокно, 4 длины волны CWDM (1271, 1291, 1311, 1331 нм) по одному волокну, компонентные потоки данных 56 Гбит/с по каждой длине волны, дальность связи до 2 км,
- QSFP56 LR4 (Long Reach): одномодовое волокно, 4 длины волны LAN-WDM по одному волокну в диапазоне 1300 нм (обычно 1295.56, 1300.05, 1304.58 и 1309.14 нм), компонентные потоки данных 56 Гбит/с по каждой длине волны, дальность связи до 10 км без FEC и до 20 км с FEC.

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении QSFP112

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении QSFP112 (Quad Small Form-factor Pluggable 112) предназначены для клиентских подключений на короткие расстояния с пропускной способностью 400 Гбит/с, прямым обнаружением (приемом) IM/DD, четырьмя компонентными сигналами со скоростью передачи 112 Гбит/с каждый (4×112G) и форматом модуляции PAM4.

Ниже представлены примеры сменных модулей приемопередатчиков QSFP112 400G (SR4, DR4, FR4, LR4) [26], используемых в ЦОДах:

- 400G QSFP112 SR4: многомодовый модуль для коротких дистанций с разъемом MPO, используются

4 компонентных сигнала (8 волокон) по 112 Гбит/с каждый, протяженность подключения до 100 м,
- 400G QSFP112 DR4: одномодовый модуль для ЦОДов, используются 4 компонентных сигнала (8 волокон) по 112 Гбит/с каждый с разъемом MPO/MTP-12, протяженность подключения до 500 м,
- 400G QSFP112 FR4: одномодовый модуль для ЦОДов, используются 4 компонентных сигнала (8 волокон) по 112 Гбит/с каждый, протяженность подключения до 2 км,
- 400G QSFP112 LR4: одномодовый модуль для ЦОДов, используется CWDM для передачи четырех компонентных сигналов по 112 Гбит/с каждый на длинах волн 1271, 1291, 1311 и 1331 нм, протяженность подключения до 10 км.

Сменные модули приемопередатчиков в конструктивном исполнении QSFP-DD или OSFP

Модули QSFP-DD (Quad Small Form-factor Pluggable Double Density) [27, 28], меньшие по размерам по сравнению с OSFP (Octal Small Form-factor Pluggable), обеспечивают высокую плотность портов в ЦОДах, предназначены для высокоскоростных городских сетей (Metro) и сетей DCi взаимодействия ЦОДов. В решениях DCO (Digital Coherent Optics), доступных в конструктивных исполнениях (форм-факторах) CFP2, QSFP-DD или OSFP, используются форматы модуляции DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM и обе поляризации DP (Dual Polarization) нормированного оптического излучения.

Для модулей в конструктивном исполнении QSFP-DD с линейными оптическими интерфейсами 400ZR/ZR+ и с когерентным обнаружением (приемом) обеспечивается дальность связи от 80–120 км без усилителей и до 1200 км и более с ними. Эти модули со встроенным радиатором для отвода тепла (энергопотребление порядка 15 Вт) имеют обратную совместимость с модулями QSFP28/56.

Ниже представлены примеры выпускаемых промышленностью когерентных линейных модулей с интерфейсами 400G ZR/ZR+ в конструктивном исполнении QSFP-DD (QSFP Double Density) & DCO:

- Cisco 400G QSFP-DD Coherent (ZR/ZR+):
  - Cisco 400G ZR QSFP-DD – поддерживает линии DWDM со скоростью передачи данных 400 Гбит/с. Применяется в ЦОДах и используется для соединений "точка-точка" с когерентным обнаружением (приемом) сигнала на расстояние до 120 км, в зависимости от параметров линии и оптических усилителей,
  - Cisco 400G ZR+ QSFP-DD – поддерживает линии DWDM со скоростью передачи данных 400 Гбит/с, оптимизирован для снижения энергопотребления в ЦОДах (DCi) и магистральных сетях протяженностью более 1000 км с использованием сложной модуляции, встроенной коррекции ошибок (FEC) и оптических усилителей,
  - Cisco 400G ZR+ High-Tx Power с увеличенным до +1...+2 дБм выходным уровнем мощности оптического излучения на стороне передачи, который помогает преодолевать высокие потери сигнала (insertion loss) в старых волоконных линиях или сложных узлах ROADM. Полностью соответствует стандартам OpenZR+ и OIF, а также поддерживает режимы обратной совместимости с обычной спецификацией 400G ZR. Предназначен для монтажа в стандартные порты маршрутизаторов и коммутаторов Cisco, заменяет громоздкие внешние транспортные системы с транспондерами/мукспондерами. Обеспечивает дальность связи до 1200 км (Ultra Long Haul) с использованием сложной модуляции, встроенной коррекции ошибок (FEC) и оптических усилителей.
- Eoptolink 400G QSFP-DD Coherent:
  - EOLD-164HG-B-5X (400G ZR) – модуль на базе Silicon Photonics (SiPho), соответствует стандарту OIF 400ZR, дальность связи до 120 км,
  - EOLD-164HG-E-5X (400G ZR+) – версия ZR+ с увеличенным бюджетом линии (Link Budget), соответствует стандарту OpenZR+ при дальности связи до 480 км, оптимизирован для региональных сетей.
- Coherent Corp / Acacia (400G/800G):
  - FTCD3323E1PCL (400G ZR/ZR+) – модуль DCO, обеспечивающий передачу данных по сети IPoDWDM с повышенным уровнем выходной оптической мощности (до 0 дБм и выше) для обеспечения дальности связи на одномодовом волокне SMF до 120 км без промежуточных оптических усилителей. В стандартных спецификациях 400ZR заявляется дальность связи от 80 км, но конкретно эта модель с повышенной выходной мощностью передатчика сертифицирована на расстояние до 120 км,
  - 800G DCO (Digital Coherent Optics) – новое поколение модулей на сетях взаимодействия ЦОДов (DCi). Дальность связи зависит от типа спецификации (ZR, OpenZR+, ZR+) и режима работы, составляет от 320–500 км для скорости передачи данных 800 Гбит/с и до 1000–2400 км при переходе на формат модуляции QPSK и скорость передачи данных 400 Гбит/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статическая и динамическая маршрутизация. [Электронный ресурс] URL: https://mikrotik-training.ru/kb/staticheskaya-i-dinamicheskaya-marshrutizatsiya/ (дата обращения 12.08.2026).
2. Что такое динамическая маршрутизация? [Электронный ресурс] URL: https://blog.ai-mix.ru/2024/11/18/chto-takoe-dinamicheskaya-marshrutizacziya/ (дата обращения 12.08.2026).
3. Основы технологии DWDM (Брошюра компании Т8). [Электронный ресурс]. URL: https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrarx7a89we9in5xc 7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf (дата обращения 12.08.2026).
4. Обзор телекоммуникационных протоколов: MPLS. [Электронный ресурс] URL: https://skomplekt.com/tools/3811773.html/ (дата обращения 12.08.2026).
5. GMPLS объединяет сетевые уровни. [Электронный ресурс]. URL: https://www.osp.ru/nets/2003/10/148943 (дата обращения 12.08.2026).
6. Концепция принудительной маршрутизации. [Электронный ресурс]. URL: https://opengl.org.ru/upravlenie-trafikom-i-kachestvo-obsluzhevaniya-v-seti/kontseptsiya-prinuditelnoi-marshrutizatsii.html (дата обращения 12.08.2026).
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 12.08.2026).
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 12.08.2026).
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 12.08.2026).
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 12.08.2026).
11. Что такое программно-определяемые сети. [Электронный ресурс]. URL: https://cloudnetworks.ru/inf-tehnologii/programmno-opredelyaemye-seti-sdn/ (дата обращения 12.08.2026).
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 12.08.2026).
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-dwdmpovyshenie-spektralnoy-ef fektivnosti-i-uvelichenie-protyazhennosti-vysokoskorostnyh/viewer (дата обращения 12.08.2026).
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 // Фотоника / Photonics Russia. 2026. № 1. [Электронный ресурс]. URL: https://www.photonics.su/journal/article/11405 (дата обращения 12.09.2026).
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 12.08.2026).
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 12.08.2026).
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 12.08.2026).

19. SDN: альтернатива или дополнение к традиционным сетям? [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/hpe/articles/255363/ (дата обращения 12.08.2026).
20. What is intent-based networking (IBN)? [Электронный ресурс]. URL: https://www.cisco.com/site/us/en/solutions/intent-based-networking/index.html (дата обращения 12.08.2026).
21. **Коган С.С.** Волоконно-оптические решения для ЦОДов с пакетными интерфейсами на основе Ethernet. Часть 3. Эволюция сменных оптических модулей приемопередатчиков (трансиверов) для ЦОДов // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2025. № 4 URL: https://t8.ru/upload/iblock/367/tw1hwpy29a5vkv8itue3g21j6z2uj0w1/Kogan_Pervaya_milya_nomer_4_VOSP_s_interfeysami_Ethernet_tretya_chast_str_70_76_2025.pdf (дата обращения 12.08.2026).
22. DWDM настраиваемый CFP 2 DCO. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fs.com/ru/products/216689.html (дата обращения 12.08.2026).
23. Оптические модули CFP 2 DCO 100G/200G/400G. [Электронный ресурс]. URL: https://files.qtech.ru/upload/optical_modules/100g/CFP 2_DCO_100G_200G_400G_datasheet.pdf (дата обращения 12.08.2026).
24. QSFP 28. [Электронный ресурс]. URL: dwdm.ru/wiki/86 (дата обращения 12.08.2026).
25. Все, что вы хотели знать о QSFP 56. URL: https://prointech.ru/kb/transivery/vsyo-chto-vy-hoteli-znat-o-qsfp 56/ (дата обращения 12.08.2026).
26. QSFP-DD против OSFP против QSFP 56 против QSFP 112: преимущества и проблемы. [Электронный ресурс]. URL: https://bouz.ru/blog/oborudovanie/qsfp-dd-protiv-osfp-protiv-qsfp 56-protiv-qsfp 112-preimushchestva-i-problemy/?srsltid=AfmBOopArpVU5EkL6P 9PTriAfH1tMTffzIyNU2ZL-I5ZIbpx_ogJmO8f (дата обращения 12.08.2026).
27. QSFP-DD. [Электронный ресурс]. URL: https://future-tech.ru/product/opticheskie-transivery/qsfp-dd/ (дата обращения 12.08.2026).
28. Сравнение трансиверов QSFP-DD и OSFP. [Электронный ресурс]. URL: https://fibotelecom.ru/articles/sravnenie_transiverov_qsfp_dd_i_osfp (дата обращения 12.08.2026).

