

Волоконно-оптические решения для ЦОДов с пакетными интерфейсами на основе Ethernet

Часть 4. Стандартизованные когерентные решения для сетей взаимодействия ЦОДов (DCI)

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2025.129.5.58.68

В цикле статей рассматриваются вопросы использования волоконно-оптических решений для поддержки в центрах хранения и обработки данных (ЦОДах) высоких скоростей передачи, включая стандартизацию решений Ethernet для потоков данных от 100 до 1600 Гбит/с (часть 1); решения для ЦОДов с использованием волоконно-оптических технологий (часть 2); эволюция сменных оптических модулей приемопередатчиков (трансиверов) для ЦОДов (часть 3); стандартизованные когерентные решения для сетей взаимодействия ЦОДов DCI (часть 4); выбор соединителей и кабелей для дата-центров (часть 5).

Введение

На фоне растущего спроса на передачу данных и быстрого расширения сети Интернет, вычислений на основе облачной сетевой инфраструктуры и т. п. важным направлением исследований становится оптимизация использования различных технологий DCI (Data Center Interconnect) на сетях взаимодействия ЦОДов. Технология когерентной передачи/приема уже применяется на сетях DCI (Data Center Interconnect) для обеспечения взаимодействия ЦОДов, в частности, для соединения двух или более ЦОДов с целью совместного использования их ресурсов для передачи, обработки и хранения данных. В контексте облачных вычислений сети DCI играют решающую роль, позволяя поставщикам услуг предлагать поверх облачной сетевой инфраструктуры в разных географических точках такие услуги, как облачное хранилище, вычисления и видео.

В ближайшей перспективе ожидается технологический скачок, связанный с внедрением новых технологий DWDM с когерентными оптическими каналами (длинами волн) пропускной способностью 800 Гбит/с, 1600 Гбит/с (1,6 Тбит/с) и более.

В области оптической связи когерентные технологии приема (обнаружения) сигнала играют решающую роль, а когерентные сменные оптические модули являются основными продуктами на основе этих технологий.

Ожидается, что технологии приема (обнаружения) сигнала с использованием сменных линейных когерентных оптических модулей будут применяться не только на сетях большой протяженности, но и на городских (Metro) сетях и сетях DCI взаимодействия ЦОДов, то есть там, где, кроме высокой скорости передачи данных, требуется высокая плотность портов с меньшими

по размеру сменными линейными когерентными оптическими модулями.

Следует отметить, что, например, в клиентском сменном оптическом модуле 400GbE в конструктивном исполнении QSFP56-DD (Quad Small Form-factor Pluggable – Double Density) используется электрический интерфейс с восемью компонентными сигналами по 50 Гбит/с каждый с 4-уровневой амплитудно-импульсной модуляцией PAM4 (8×50G PAM4) или электрические интерфейсы DR4/FR1/FR4/LR1/LR4 с четырьмя компонентными сигналами по 100 Гбит/с с 4-уровневой амплитудно-импульсной модуляцией PAM4 (4×100G PAM4). А в линейном когерентном сменном оптическом модуле пропускной способностью 400 Гбит/с в конструктивном исполнении QSFP-DD применяются электрический интерфейс ODUC4 (OTN) и форматы модуляции DP-QPSK (DP: Dual Polarization, то есть обе поляризации оптического сигнала) или DP-8QAM либо DP-16QAM.

Эволюция к стандартизованным решениям для оптических сетей привела к разработке различных технических требований для когерентных оптических интерфейсов, включая интерфейсы ZR (Ze Best Range) и ZR+ (Ze Best Range plus). Интерфейсы ZR и ZR+ связаны с когерентной оптической технологией, которая произвела революцию в сфере передачи данных по волоконно-оптическим системам передачи (ВОСП).

В настоящее время выпущены или находятся на разных стадиях разработки согласованные технические требования к сменным когерентным модулям приемопередатчиков с интерфейсами 400G ZR/ZR+, 400G OpenZR+, 400G Open ROADM. Кроме того, производители оборудования предлагают свои решения типа Multi-Haul DCO" [32–34].

Сменные когерентные модули приемопередатчиков с интерфейсами 400ZR

Разработанные форумом по оптической совместимости OIF (Optical Interworking Forum) технические требования к интерфейсу 400ZR – это одна из первых попыток определить стандартизованный совместимый когерентный интерфейс для каналов пропускной способностью 400 Гбит/с. Слово "совместимый" означает, что сменные когерентные модули разных производителей смогут взаимодействовать на одной сети. В данном контексте это "открытые" решения.

Для сменного оптического когерентного модуля 400ZR изначально указывалось целевое энергопотребление 15 Вт при дальности связи порядка 80 км [36, 37]. Эти технические требования были намеренно понижены, с тем чтобы гарантировать, что

энергопотребление модуля соответствует тепловым ограничениям сменных модулей малого физического размера, например QSFP-DD. Решения для сменных когерентных модулей приемопередатчиков 400ZR важно было оптимизировать по стоимости, физическим размерам и энергопотреблению.

Выпущенное для этого когерентного интерфейса в марте 2020 года Соглашение OIF о внедрении (Implementation Agreement) определяет следующие основные характеристики интерфейса 400ZR:

- скорость передачи данных: 400 Гбит/с;
- дальность связи без использования ОЕО преобразования: до 120 км;
- формат модуляции: квадратурная амплитудная модуляция 16QAM;
- конструктивное исполнение (форм-фактор) сменного оптического модуля: QSFP-DD, OSFP и CFP2;
- коды с обнаружением и исправлением ошибок, возникающих при передаче по ВОСП: открытая прямая коррекция ошибок openFEC (oFEC) и облегченный алгоритм их коррекции;
- энергопотребление: оптимизировано для сменных оптических модулей, энергопотребление которых должно быть не более 15–20 Вт.

Интерфейсы 400ZR применяются:

- на высокоскоростных соединениях ЦОДов в конфигурации "точка – точка", например, при соединении нескольких ЦОДов в городских районах;
- для приложений с короткой и средней дальностью связи: обычно до 120 км;
- на уровне агрегации и ретрансляции трафика (backhaul) сетей мобильной связи;
- на сетях, в которых энергоэффективность и применение сменных модулей приемопередатчиков имеют решающее значение;
- на сетях, требующих прямого соединения "маршрутизатор – маршрутизатор" без использования такого промежуточного транспортного оборудования, как, например, транспондеры/мультиплексеры ВОСП OTN/DWDM;
- поставщиками облачных услуг, желающими уменьшить капитальные и эксплуатационные расходы.

Сменный оптический когерентный модуль 400 ZR разработан для оптических каналов (длин волн) волоконно-оптической системы передачи с разделением каналов по длине волны оптического излучения DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) и выпускается в основном (из-за более низкой цены и меньшего размера по сравнению с другими вариантами) в конструктивном исполнении QSFP-DD. Этот модуль совместим

с аналогичными модулями, выпускаемыми различными производителями, и ориентирован на пропускную способность оптического канала 400 Гбит/с. Сменные модули с интерфейсами 400ZR от нескольких поставщиков доступны с 2021 года.

Сменные когерентные модули приемопередатчиков с интерфейсами 400G ZR+/OpenZR+ и 400G Open ROADM MSA

Одновременно с OIF технические требования к сменным когерентным модулям, необходимым для создания более протяженных и гибких оптических каналов пропускной способностью от 100 до 400 Гбит/с, разрабатывали группы OpenZR+ и OpenROADM.

- Интерфейс **ZR+** является расширением стандарта 400ZR.

Он разработан производителями оборудования с целью устранения ряда ограничений интерфейса 400ZR, обеспечивает большую гибкость решения, дальность связи и формально не является стандартом. Интерфейс ZR+:

- заполняет пробел между традиционным транспортным оборудованием и решением, основанным на использовании сменных оптических модулей приемопередатчиков с интерфейсом ZR,
- позволяет достичь характеристик традиционных линейных систем при удобствах и экономичности использования сменных оптических модулей приемопередатчиков; это универсальное решение для сетевых операторов, которые планируют расширить сети DCI обеспечения взаимодействия ЦОДов до городских (Metro) и региональных (Regional) сетей.

Основные характеристики интерфейса ZR+:

- скорость передачи данных: от 100 до 400 Гбит/с,
- дальность связи: более 500 км (в зависимости от реализации иногда до 1000 км),
- формат модуляции: гибкий выбор формата модуляции (16QAM, 8QAM, QPSK) в зависимости от скорости передачи данных и требуемой дальности связи,
- конструктивное исполнение (форм-фактор): QSFP-DD, OSFP и CFP2,
- коды с обнаружением и исправлением ошибок: SD-FEC (Soft-Decision Forward Error Correction), более мощный, чем oFEC,
- энергопотребление: выше, чем у 400ZR из-за расширенных возможностей ЦСП.

Сменные модули с интерфейсом ZR+ особенно подходят:

- для городских и региональных сетей, требующих большей дальности связи, чем это возможно для интерфейса 400ZR,
- приложений, требующих гибкости по дальности связи с возможностью выбора скорости передачи данных от 100 до 400 Гбит/с,
- сетей, требующих расширенных возможностей по контролю характеристик ВОСП,
- сетей, для которых важна оптимизация по параметру спектральной эффективности.

Интерфейс **OpenZR+** MSA (Multi-Source Agreement) представляет собой результат усилий групп 400ZR и Open ROADM, предпринятых для поддержки таких функций, как:

- использование более эффективного кода с обнаружением и исправлением ошибок, а именно OpenFEC (oFEC) из стандарта Open ROADM, для увеличения дальности связи,
- передача по оптическому каналу клиентских сигналов 100GbE и 200GbE,
- организация оптических каналов пропускной способностью от 100 до 400 Гбит/с с возможностью выбора форматов модуляции QPSK, 8QAM либо 16QAM для оптимизации дальности связи с учетом скорости передачи данных.

У сменного компактного когерентного модуля с интерфейсом OpenZR+ MSA конструктивное исполнение (форм-фактор) QSFP-DD и энергопотребление не более 25 Вт. Этот модуль предназначен для использования на волоконно-оптических городских, региональных и магистральных сетях большой протяженности: оптические каналы на этих сетях пропускной способностью от 100 до 400 Гбит/с [33, 34]. Дальность связи по каналу пропускной способностью 400 Гбит/с и с интерфейсом OpenZR+ MSA (при передаче данных по стандартному одномодовому волокну SMF-28 с использованием оптических усилителей EDFA) теоретически достигает 500 км. На реальных сетях с различной протяженностью оптических участков сети OTS (Optical Transport Section), частотной полосой канала 75 ГГц, промежуточными узлами в конфигурации ROADM, а также с учетом запаса порядка 2 дБ (на старение компонентов, колебания температуры, потери, зависящие от поляризационных дисперсионных искажений и нелинейных взаимодействий) дальность связи будет в диапазоне от 300 до 400 км.

Сменный компактный когерентный модуль с интерфейсом OpenZR+ MSA может быть размещен в различных корпусах, включая QSFP-DD, OSFP и CFP2-DCO. Размер корпуса модуля не имеет значения с точки

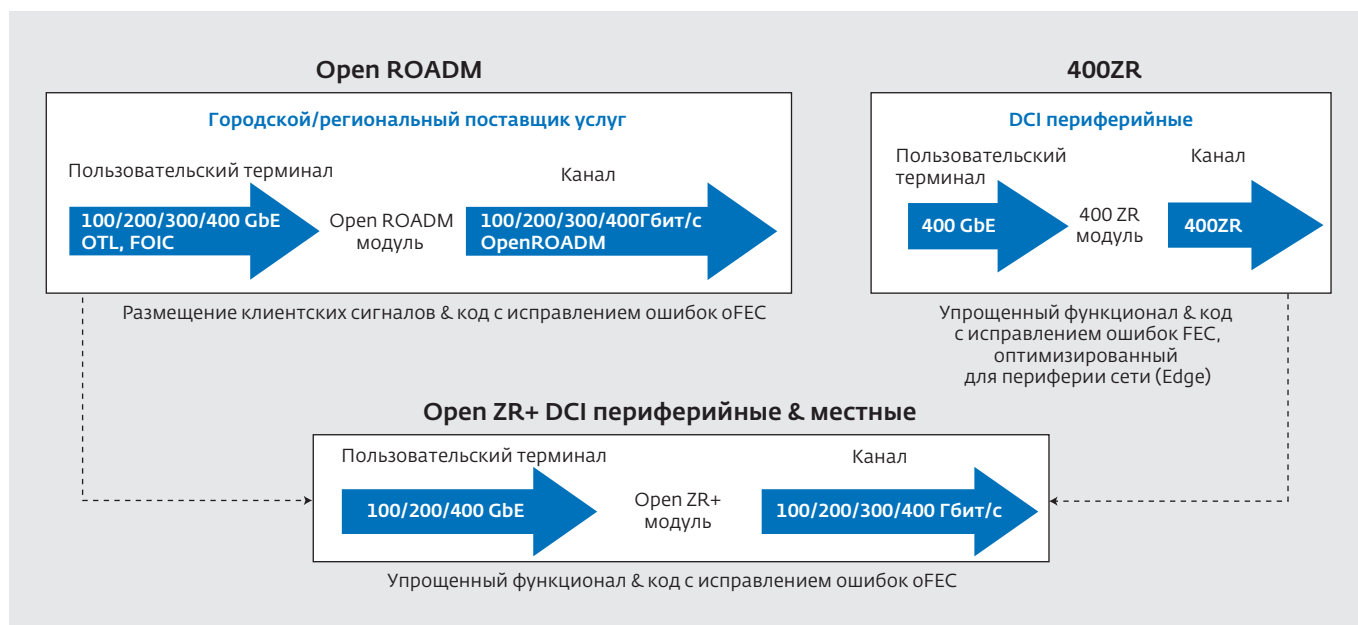


Рис.8. Сравнение когерентных решений 400ZR, Open ZR+ и Open ROADM [36]

зрения совместимости характеристик линейного интерфейса.

- Интерфейс **Open ROADM MSA**. Основная цель этой инициативы, запущенной в 2016 году, заключалась в объединении нескольких поставщиков и сетевых операторов для внедрения открытых, масштабируемых, экономически эффективных и гибких решений для проектирования сетей с узлами, включающими реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода/вывода ROADM. Интерфейс Open ROADM MSA определяет технические требования для обеспечения функциональной совместимости в сетях с узлами ROADM, включая системы контроля и управления сетью. Решение Open ROADM, эффективно управляющее клиентским трафиком с интерфейсами от 100 до 400GbE и от 100 до 400 Гбит/с OTN в типичном диапазоне развертывания 500 км, является наилучшим для применения в различных сетевых конфигурациях на городских и региональных сетях [37].

На рис.8 представлен результат сравнения когерентных решений 400ZR, Open ZR+ и Open ROADM.

Сменные когерентные модули приемопередатчиков с интерфейсом 400G Multi-Haul DCO

Сменные когерентные модули Multi-Haul DCO (DCO: Digital Coherent Optics) характеризуются улучшенными

техническими характеристиками и увеличенными физическими размерами (например, CFP2-DCO). Эти модули отличаются более высоким уровнем оптической мощности на передающей стороне (Tx) и оптическими компонентами (драйверами, трансимпедансным усилителем, модуляторами, лазерами) с улучшенными параметрами. Для достижения большей дальности связи в них используются алгоритмы SD-FEC для обнаружения и исправления ошибок передачи.

В состав сменных когерентных модулей Multi-Haul DCO типа CFP2-DCO, QSFP28-DCO, QSFP-DD DCO и OSFP-DCO обычно входят обладающие гибкостью для адаптации к различным сетевым средам когерентные оптические приемники и цифровые сигнальные процессоры (ЦСП/DSP), которые активно способствуют построению эффективной и надежной инфраструктуры оптической связи.

Сменный модуль приемопередатчика **QSFP28-DCO** оказался среди трендовых технологий 2024 года. Он сочетает в себе компактное конструктивное исполнение (форм-фактор) модуля QSFP28 с когерентной оптикой, что позволяет улучшить характеристики и увеличить дальность связи.

200G CFP2-DCO – сменный когерентный модуль приемопередатчика для потоков 100 и 200 Гбит/с на одну длину волны (физическими размерами 106×41,5×12,4 мм) соответствует стандарту CFP2 MSA и предназначен для DCI DWDM соединений ЦОДов на сетях операторов городских, региональных и магистральных сетей связи

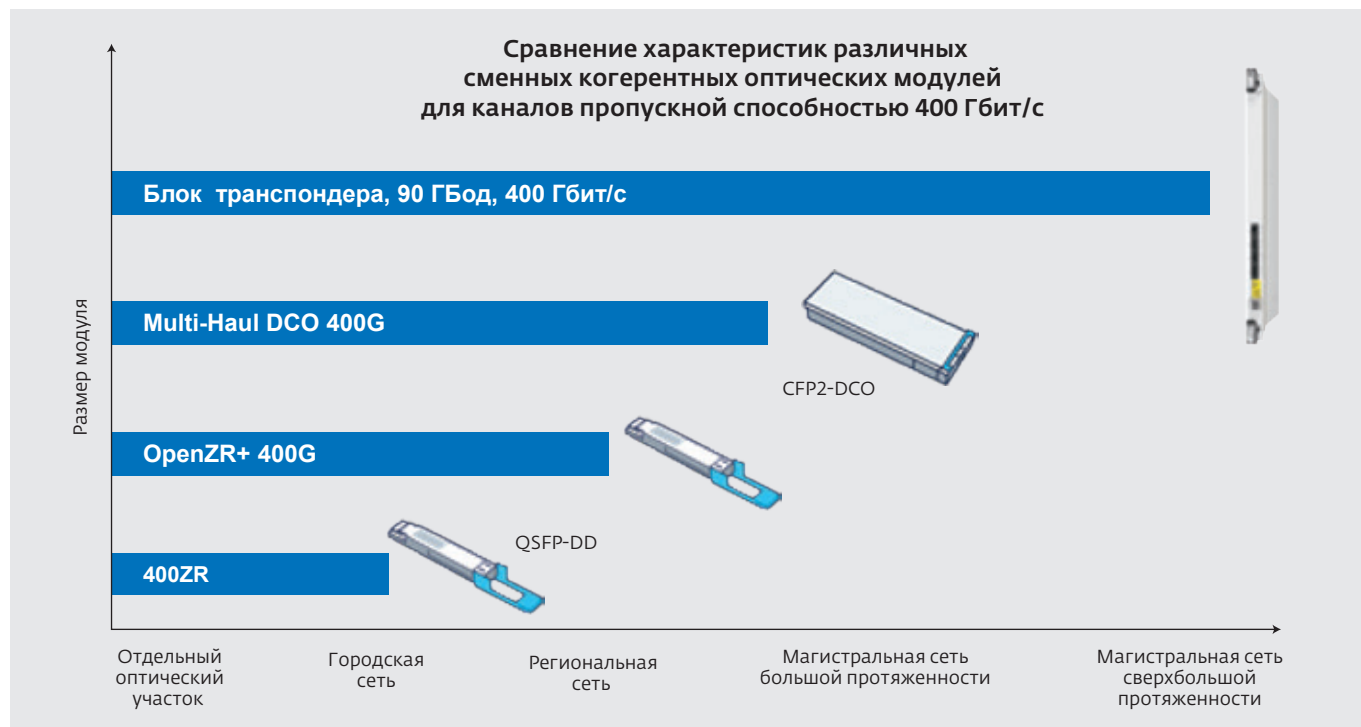


Рис.9. Размеры и назначение сменных когерентных модулей 400G

большой протяженности. Цифровой когерентный сменный оптический приемопередатчик CFP2 со скоростью передачи данных 100 и 200 Гбит/с на длину волны поддерживает формат модуляции DP-QPSK для канала скоростью 100 Гбит/с и DP-8/16QAM – для канала 200 Гбит/с. Также обеспечивается поддержка DWDM гибкой сетки частот Flexgrid [38, 39].

Сменный когерентный модуль приемопередатчика **400G CFP2-DCO** разработан с учетом технических требований OpenROADM, OpenZR+, OIF 400ZR для поддержки соединений с пропускной способностью 400 Гбит/с на сетях доступа беспроводной транзитной сети и DCI взаимодействия ЦОДов. Этот модуль включает в себя СБИС ЦСП, реализованный по технологии КМОП 7-нм, и кремниевую фотонную интегральную схему PIC (Photonic Integrated Circuit) [40]. Сравнение характеристик сменных когерентных оптических модулей приемопередатчиков разных размеров для каналов пропускной способностью 400 Гбит/с представлено на рис.9.

Для ограничения энергопотребления в технических требованиях к интерфейсам OpenZR+ снижается уровень выходной (Tx) оптической мощности (интенсивности сигнала) до -10 дБм при значении OSNR на стороне передачи порядка 34 дБм. Когерентный модуль CFP2-DCO или транспондер со встроенным решением обеспечивает уровень выходной (Tx) оптической

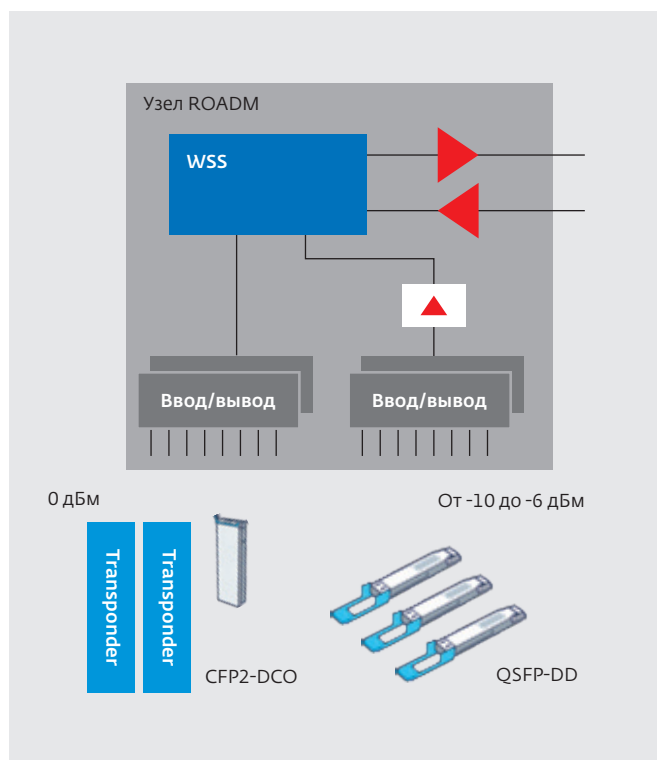


Рис.10. Дополнительное усиление оптического сигнала при использовании маломощных сменных модулей в корпусе QSFP-DD

Таблица 4. Сравнение характеристик интерфейсов 400G когерентной оптической линии [32]

Параметры	400ZR	OpenZR+	Multi-haul DCO
Возможность взаимодействия с оборудованием разных производителей	Да	Да	Нет (частное решение)
Основная область применения	Конфигурация "точка – точка", один волоконно-оптический участок сети	Конфигурации "точка – точка" или сеть с многочисленными волоконно-оптическими участками сети и узлами ROADM (ввод/вывод оптических каналов может быть реализован с использованием оптических усилителей)	Сеть с многочисленными волоконно-оптическими участками сети и узлами ROADM. Возможно использование в узлах сети оборудования с централизованной матрицей OTN кросс-коммутации трактов
Дальность оптической связи	Дальность связи до 120 км	Дальность связи порядка 400 км	Для каналов пропускной способностью от 100 до 400 Гбит/с дальность связи от 500 до 2000 км и более
Пропускная способность	400 Гбит/с	От 100 до 400 Гбит/с	От 100 до 400 Гбит/с
Формат модуляции	DP-16QAM	DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM	DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM
Символьная скорость	Порядка 60 ГБод	30 ГБод для 100 Гбит/с и 60 ГБод для 200–400 Гбит/с	От 28 до 64 ГБод
Выходной уровень оптической мощности	–10 дБм	–10 дБм	0 дБм
Клиентский интерфейс	100 и 400 GbE	100 и 400 GbE	100 GbE/OTU4 и 400 GbE
Энергопотребление	От 15 до 20 Вт	От 18 до 20 Вт	От 20 до 26 Вт
Конструктивное исполнение	QSFP-DD, OSFP, CFP2-DCO	QSFP-DD, OSFP, CFP2-DCO	CFP2-DCO

мощности (интенсивности сигнала) порядка 0 дБм при значении OSNR на стороне передачи порядка 44 дБ. Поскольку именно значение OSNR в конечном итоге ограничивает дальность связи, наилучшие результаты по данному показателю достигаются с более высокими значениями OSNR на стороне передачи.

Большей части систем WDM для правильной работы требуется выходной уровень оптической мощности (Tx) на линейном интерфейсе в диапазоне от –2 до +2 дБм. При более низком уровне оптической мощности на линейном интерфейсе, в частности, в модулях QSFP-DD, понадобится дополнительно увеличить уровень сигнала с использованием оптических усилителей (рис.10).

Операторы, использующие клиентские интерфейсы OTN (OTU4), могут ориентироваться на сменные оптические модули OpenROADM и Multi-Haul DCO, поскольку они поддерживают клиентские сигналы как Ethernet, так и OTN. Но технические требования к этим модулям определяются конкретным производителем. Сравнение

характеристик интерфейсов 400ZR, OpenZR+ и Multi-Haul DCO для когерентной оптической линии представлено в табл.4.

Когерентный интерфейс OIF 800ZR

В соответствии с техническими требованиями 800ZR IA (800ZR Coherent Interface Implementation Agreement), разработанными OIF для однопролетных волоконно-оптических участков сети с DWDM протяженностью от 80 до 120 км (согласно сообщению от 30 октября 2024 года [41]), возможна передача по одному когерентному оптическому каналу (длине волны) пропускной способностью до 800 Гбит/с клиентских подключений от 100 до 800GbE. Решение 800ZR IA ориентировано на использование экономически эффективных, маломощных сменных модулей приемопередатчиков в конструктивном исполнении (форм-факторе) QSFP-DD, который обеспечивает высокую плотность портов в оборудовании ЦОДов. Кроме того, поддерживаются решения 800ZR и 800G OpenZR+.

Таблица 5. Сравнение характеристик интерфейсов 400/800/1600G когерентной оптической линии

Параметры	400ZR	800ZR	1600ZR	1600ZR+
Клиентские сигналы	400 GbE	8 x 100GbE, 4 x 200GbE, 2 x 400GbE, 800-ETC, 800 GbE	1600 Гбит/с (разнообразные клиентские сигналы, аналогично 800ZR)	1600 Гбит/с (разнообразные клиентские сигналы, аналогично 800ZR)
Дальность оптической связи (км)	От 80 до 120	От 80 до 120	От 80 до 120	1600 Гбит/с до 1000, 1200 Гбит/с до 2000
Символьная скорость (Бод)	60	120	Порядка 235	Порядка 247–263
Полоса частот канала (ГГц)	75	150	300	300
Формат модуляции	DP-16QAM	DP-16QAM	DP-16QAM	Разные форматы и обработка PCS (Probabilistic constellation shaping)
Коды с исправлением ошибок (FEC)	cREC	oFEC	oFEC	oFEC

На выставке ECOC 2024 во Франкфурте OIF была продемонстрирована совместимость когерентных интерфейсов 800ZR/ZR+ различных производителей и готовность этой технологии к развертыванию в приложениях DCI с высокой пропускной способностью.

Когерентный интерфейс OIF 1600ZR

Согласно сообщению от 18 января 2025 года, OIF расширил работу по подготовке уточненных технических требований к сменным когерентным оптическим модулям приемопередатчиков для каналов пропускной способностью 1600 Гбит/с, включив в нее проект, дополняющий инициативы 1600ZR и 1600ZR+ [42].

В сентябре 2023 года OIF объявил о проекте 1600ZR по разработке когерентных решений для каналов 1600 Гбит/с дальностью действия от 80 до 120 км.

В январе 2024 года OIF сообщил о разработке спецификации 1600ZR+, то есть улучшенной версии 1600ZR, с дальностью действия до 1000 км.

Последние уточнения связаны с решениями для когерентной передачи на короткие расстояния от 2 до 20 км с возможностью их увеличения до 40 км и с низкой задержкой (менее 300 нс). Низкая задержка соответствует требованиям для рабочих нагрузок и вычислительных ресурсов, распределенных по ЦОДам. Удвоение скорости передачи данных с 800 до 1600 Гбит/с для сменных оптических модулей для соединений протяженностью от 2 до 40 км – это новая линия соприкосновения технологий (когерентной и прямого обнаружения IMDD).

При обсуждении решений для 800 Гбит/с члены OIF спорили о том, можно ли интерфейсы 800ZR и 800LR реализовывать с использованием одного и того же

когерентного цифрового сигнального процессора (ЦСП). Некоторые представители OIF утверждали, что если не будет разработан специальный когерентный ЦСП для 800LR, то когерентные решения из-за своей сложности и высокой стоимости не смогут конкурировать с решениями на основе метода прямого обнаружения IMDD.

Тот факт, что в OIF взялись руководить работой над составлением технических требований к интерфейсу 1600ZR+, рассматривается как значительный сдвиг в достижении общепромышленной совместимости по отношению к предыдущим разработкам 400ZR+ и 800ZR+. Для интерфейсов ZR члены OIF согласовали схемы построения циклов (кадров) и цифровой обработки сигнала, а также использование в этом проекте схемы oFEC прямой коррекции ошибок. Надежная схема oFEC увеличивает задержку соединения. По этой причине, то есть для уменьшения задержки, члены OIF хотят использовать для 1600ZR менее мощную прямую коррекцию ошибок.

Для достижения дальности связи от 80 до 120 км для интерфейса 1600ZR выбран формат модуляции 16-QAM при символьной скорости 235 ГБод (табл.5).

Применительно к интерфейсу 1600ZR+ остаются некоторые открытые вопросы. Один из них заключается в том, что для достижения дальности связи 1000 км участники выбирают одну, две или четыре поднесущие. С использованием поднесущих ограничения можно ослабить, что позволит увеличить количество производителей таких модулей. Сторонники применения одной несущей утверждают, что использование нескольких поднесущих усложнит реализацию когерентного ЦСП.

Члены рабочей группы должны также выбрать параметры вероятностного формирования созвездия PCS (Probabilistic constellation shaping). Обработка PCS не только увеличит дальность связи, но и позволит снизить символьную скорость, а, следовательно, и требования к полосе пропускания для компонентов когерентного модуля. Символьная скорость для модуля 1600ZR+ находится в диапазоне от 247 до 263 ГБод.

Ранее предполагалось, что энергопотребление модуля 1600ZR составит 26 Вт, но теперь ожидается на уровне 30 Вт или даже больше. Прогнозируется, что энергопотребление модуля 1600ZR+ будет еще выше. Потребляемая мощность когерентного подключаемого модуля будет зависеть от технологического процесса КМОП, который разработчики когерентного ЦСП выберут для СБИС модулей 1600ZR и 1600ZR+. Останутся они на КМОП по технологии 3 нм или будут ждать, пока станут доступны технологические процессы 2 нм или даже 1,8 нм, с тем чтобы воспользоваться преимуществами по быстродействию и энергопотреблению, покажет время.

Соглашения о реализации (AI) для 1600ZR и 1600ZR+ могут быть достигнуты в 2025 году, что проложит путь к производству первых сменных когерентных модулей 1600ZR/ZR+ в 2026 году.

ЛИТЕРАТУРА

- Advances in Beyond 400G Optical Transport Network Standards and Technologies. [Электронный ресурс]. URL: [https://docbox.etsi.org/ISG/F5G/Open/F5G%20External%20Presentations%202023/ECOC%202023/6.%20ECOC2023%20-%20F5G%20Workshop%20Nokia%20\(Huber\).pdf](https://docbox.etsi.org/ISG/F5G/Open/F5G%20External%20Presentations%202023/ECOC%202023/6.%20ECOC2023%20-%20F5G%20Workshop%20Nokia%20(Huber).pdf) (дата обращения 18.04.2025).
- От 100G к 800G. Будь готов! [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iksmedia.ru/articles/5862559-Ot-100G-k-800G-Bud-gotov.html> (дата обращения 18.04.2025).
- O-Band Coherent: An Idea Whose Time Is (Nearly) Here. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marvell.com/blogs/o-band-coherent-a-idea-whose-time-is-nearly-here.html> (дата обращения 18.04.2025).
- The Evolution of Ethernet Standard. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.edge-core.com/solution-inquiry.php?cls=6&id=52> (дата обращения 18.04.2025).
- From 100G to 1.6T Navigating Timing in the New Era of High-Speed Optical Networks. [Электронный ресурс]. URL: https://cache.webcasts.com/content/penn001/1657525/content/568373e2f427e0f7a5f4df6d049c432eb057149/pdf/Epson-Lightwave_webinar.pdf (дата обращения 18.04.2025).
- Get to know us. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.commscope.com/about-us/> (дата обращения 18.04.2025).
- Стандарт ETC 800 GbE и новые стандарты IEEE 802.3 800/1600 GbE. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.edge-core.com/blogs/towards-800g-and-1600g-ethernet/> (дата обращения 18.04.2025).
- Ethernet Technology Consortium. 800G specification. [Электронный ресурс]. URL: https://ethernettechnologyconsortium.org/wp-content/uploads/2021/10/Ethernet-Technology-Consortium_800G-Specification_r1.1.pdf (дата обращения 18.04.2025).
- Marvell Introduces 1.6 Tbps LPO Chipset to Enable Optical Short-reach, Scale-up Compute Fabric Interconnects. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marvell.com/company/newsroom/marvell-introduces-1-6-tbps-lpo-chipset.html> (дата обращения 18.04.2025).
- From 800G to 3.2T: Innovations and Future Trends in Data Communication Interconnect Technology. [Электронный ресурс]. URL: <https://htfuture.com/from-800g-to-3-2t-innovations-and-future-trends-in-data-communication-interconnect-technology/> (дата обращения 18.04.2025).
- Коган С.С., Наний О.Е., Трещиков В.Н.** Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Пропускная способность и эволюция форматов модуляции // Прикладная фотоника. 2024. № 1. С. 84–98. [Электронный ресурс]. URL: <https://t.me/OpticalNetworksRussia/893> (дата обращения 18.04.2025).
- Коган С.С., Наний О.Е., Трещиков В.Н.** Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Часть 2. Дальность связи, спектральная эффективность и символьная скорость // Прикладная фотоника. 2024. № 2. С. 5–25. [Электронный ресурс]. URL: <https://t.me/OpticalNetworksRussia/893> (дата обращения 18.04.2025).
- EML и DML: в чем отличия? [Электронный ресурс]. URL: <https://skeo.ru/articles/eml-i-dml-v-chjom-otlichiya> (дата обращения 18.04.2025).
- Ethernet vs. Carrier Ethernet: How do they differ? TechTarget. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/answer/Ethernet-vs-Carrier-Ethernet-How-do-they-differ> (дата обращения 18.04.2025).

15. 100G межсоединение ЦОД (DCI) в метро: когерентное и прямое обнаружение. [Электронный ресурс]. URL: <https://community.fs.com/ru/article/100g-metro-data-center-interconnectivity-dci-coherent-vs-direct-detection.html> (дата обращения 18.04.2025).
16. **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://t.me/OpticalNetworksRussia/690> (дата обращения 18.04.2025).
17. **Коган С.С.** Транспортные ВОСП большой пропускной способности. Часть 2. Эволюция когерентных цифровых сигнальных процессоров. Начало // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 4. С. 38–42. Окончание // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 5. С. 78–85. [Электронный ресурс]. URL: <https://t.me/OpticalNetworksRussia/690> (дата обращения 18.04.2025).
18. **Коган С.С.** Транспортные ВОСП большой пропускной способности. Часть 3. Эволюция технологий для изготовления когерентных ЦСП. Начало // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 7. С. 66–71. Окончание // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 8. С. 68–73. [Электронный ресурс]. URL: <https://t.me/OpticalNetworksRussia/690> (дата обращения 18.04.2025).
19. Digital Signal Processing Techniques for High-Speed Optical Communications Links. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/332110044_Digital_Signal_Processing_Techniques_for_High-Speed_Optical_Communications_Links/figures?lo=1 (дата обращения 18.04.2025).
20. The History of Optical Transceiver Form Factors. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.prooptix.com/news/transceiver-form-factors/> (дата обращения 22.05.2025).
21. Что находится в оптическом модуле? [Электронный ресурс]. URL: https://an-lan.ru/articles/chto-nahoditsya-v-opticheskom-module?srsId=AfmBOorezZd8How3C_N90i-HKCM45JawvAc-PekefZ3gT19MsBSIKaQCO (дата обращения 22.05.2025).
22. Что такое модуль SFP? И в чем разница между SFP, SFP+, SFP28, QSFP+, QSFP28, QSFP-DD, и OSFP? [Электронный ресурс]. URL: https://www.nix.ru/computer_hardware_news/hardware_news_viewer.html?id=213117 (дата обращения 22.05.2025).
23. Что такое волоконно-оптические кабели типа OM и OS? [Электронный ресурс]. URL: <http://ru.zion-communication.com/Различия-между-OS1%2C-OS2-и-OM1%2C-OM2%2C-OM3%2C-OM4-и-OM5-id44641257.html> (дата обращения 22.05.2025).
24. SC и LC оптические коннекторы. Типы и теория применения. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.teleserv.ru/services/inzhenernaya-infrastruktura/slabotochnye-sistemy/vols/sc-i-lc-opticheskie-konnektory/> (дата обращения 22.05.2025).
25. Адаптер оптический LC/UPC SM duplex. [Электронный ресурс]. URL: <https://componentltd.ru/catalog/adaptery-opticheskie-prokhodnye/opticheskiy-dupleksnyy-adapter-lc-upc-sm/#:~:text=Оптический%20адаптер%20LC%2FUPC%20SM,стыкуются%20с%20использованием%20керамического%20центратора> (дата обращения 22.05.2025).
26. Оптические коннекторы MPO/MTP. [Электронный ресурс]. URL: https://modultech.ru/opticheskie-konnektory-mpo-mtp/?srsId=AfmBOop1akkeoypp5HTqLLDM_gv_IL3qx_F-NCOJazTSniXF_ASgfMUn (дата обращения 22.05.2025).
27. RJ-45. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RJ-45> (дата обращения 22.05.2025).
28. FS: Обзор модулей CFP/CFP2/CFP4/CFP. [Электронный ресурс]. URL: <https://community.fs.com/ru/article/a-comprehensive-understanding-of-cfp-transceiver-modules.html> (дата обращения 22.05.2025).
29. Optical Transceiver Introduction. [Электронный ресурс]. URL: https://ru.etulinktechnology.com/blog/connection-scheme-of-optical-modules-with-different-rates-and-optical-patch-cord_b424 (дата обращения 22.05.2025).
30. Marvell® Ara 1.6T (8×200Gbps). PAM4 retimer DSP for pluggable optical transceiver applications. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marvell.com/content/dam/marvell/en/public-collateral/dsp/marvell-ara-pam4-dsp-product-brief.pdf> (дата обращения 22.05.2025).
31. Marvell to Demonstrate Industry's First 400G/lane PAM4 Electrical-to-Optical Link Technology at OFC 2025. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marvell.com/company/newsroom/marvell-to-demonstrate-industrys-first-400g-lane-pam4-electrical-to-optical-link-technology-at-ofc-2025.html> (дата обращения 22.05.2025).
32. Understanding 400ZR/OpenZR+/400ZR+ Optics. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lightwaveonline.com/optical-tech/transmission/article/14188934/understanding-400zr-openzr-400zr-optics> (дата обращения 22.05.2025).

**11-12
СЕНТЯБРЯ
НОВОСИБИРСК**

V Международная выставка-форум



ПРОБЕЗОПАСНОСТЬ 2025
отраслевые решения систем безопасности

**ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ
СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ
ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕПЯТСТВИЯ**

80 ВЕДУЩИХ
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

2000 УЧАСТНИКОВ
И ЭКСПЕРТОВ

50 НАПРАВЛЕНИЙ
ПО БЕЗОПАСНОСТИ

При поддержке Правительства Новосибирской области



Правительство
Новосибирской области

PROtech



**НОВОСИБИРСК
ЭКСПО ЦЕНТР**



Контакты организатора

Верещагин Сергей Владимирович
Телефон: +7-913-208-72-80
E-mail: sv@pro-tek.pro

Зарегистрироваться



форумпробезопасность.рф

33. 400G ZR vs. Open ROADM vs. ZR+ What's the Difference? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fs.com/blog/400g-zr-vs-open-roadm-vs-zr-5271.html> (дата обращения 22.05.2025).
34. 400G ZR и ZR+ – новое поколение решений для оптической связи на большие расстояния. [Электронный ресурс]. URL: <https://community.fs.com/ru/article/400g-zr-and-zr-new-generation-of-solutions-for-longer-reach-optical-communications.html> (дата обращения 22.05.2025).
35. Cisco 400G QSFP-DD UH Coherent Optics Module. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/400g-qsfp-dd-haul-coherent-module-ds.html> (дата обращения 22.05.2025).
36. Сравнение 400ZR/ZR+, Open ROADM и Open ZR+. [Электронный ресурс]. URL: <https://community.fs.com/ru/article/comparison-of-400zr-open-roadm-and-openzr.html> (дата обращения 22.05.2025).
37. ROADM для передачи 400G WDM. [Электронный ресурс]. URL: <https://community.fs.com/ru/article/roadm-for-400g-wdm-transmission.html> (дата обращения 22.05.2025).
38. 200G CFP2-DCO. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.fiber-optical-transceivers.com/fiber-optic-transceivers/400g-optical-module/200g-cfp2-dco.html> (дата обращения 22.05.2025).
39. Data Center OTN/DWDM solution. [Электронный ресурс]. URL: <https://10G/100G/200G/400G/800G> <https://htfuture.com/> (дата обращения 22.05.2025).
40. Когерентный оптический модуль CFP2-DCO, 400 Гбит/с для белого ящика. [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.fiber-optical-transceivers.com/fiber-optic-transceivers/400g-optical-module/400gbps-cfp2-dco-coherent-optical-module-for.html> (дата обращения 22.05.2025).
41. OIF. Press-releases/Press Room. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oiforum.com/oif-releases-800zr-coherent-interface-implementation-agreement-ia-and-key-400zr-ia-updates-addressing-market-demands-for-scalable-interoperable-high-capacity-solutions/> (дата обращения 22.05.2025).
42. OIF adds a short-reach design to its 1600ZR/ ZR+ portfolio. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazettabyte.com/home/2025/1/18/oif-adds-a-short-reach-design-to-its-1600zr-zr-portfolio.html> (дата обращения 22.05.2025).



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



М.: ТЕХНОСФЕРА, 2024. – 204 с.,
ISBN 978-5-94836-682-1

Цена 1300 руб.

Воробьев Н.В., Грязнов В.А.

Многочастотные антенные решетки и их применение в радиотехнических системах

Монография посвящена исследованию нового типа антенн – многочастотных антенных решеток и пространственно-временных преобразователей в интересах развития технологий формирования мощных широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов. Показана возможность их применения в средствах радиоэлектронной борьбы для формирования заградительной по пространству помехи, в средствах функционального подавления для формирования ШП и СШП импульсных сигналов мощностью до гигаватта методом пространственно-временного преобразования многочастотного сигнала, а также в перспективных радиолокационных системах с СШП-сигналом и подавлением боковых лепестков в диаграмме направленности антенны и зондирующем сигнале методом мультипликативной обработки.

В книге приведены результаты исследований, проведенных авторами в период с конца 80-х годов прошлого века по настоящее время в МРТИ РАН и АО «Концерн радиостроения «Вега». Основные результаты исследований защищены патентами РФ и представлены в журнале «Радиоэлектронные технологии» № 1,3 2022г. и №1 2023 г.

Монография предназначена для широкого круга специалистов в области радиолокации, техники РЭБ, а также инженеров и научных сотрудников, занимающихся разработкой антенных систем, преподавателей, аспирантов и студентов радиотехнических факультетов.

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphere.ru; sales@technosphere.ru

23–26 СЕНТЯБРЯ 2025

ИНФОФОРУМ ПОВОЛЖЬЕ

7^Я МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО
ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И
ИНФОРМАЦИОННОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ
В ПРИВОЛЖСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

НИЖНИЙ НОВГОРОД

