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

Часть 3. Эволюция сменных оптических модулей приемопередатчиков (трансиверов) для ЦОДов

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2025.128.4.70.78

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).

Представим историю выпуска сменных оптических модулей приемопередатчиков (трансиверов) с различной функциональностью и в разном конструктивном исполнении для ЦОДов [20].

Изначально сети полагались на решения 100 Мбит/с и 1 Гбит/с, а 10 Гбит/с считались дорогостоящим вариантом. В настоящее время надежную работу на протяженных соединениях обеспечивают приемопередатчики пропускной способностью до 100 Гбит/с. Для подключений и соединений такой пропускной способности промышленность выпускает сменные оптические модули в различном конструктивном исполнении: CFP, CFP2, CFP4, QSFP28.

Как показано на рис.7, сменные оптические модули пропускной способностью 200 Гбит/с представлены преимущественно в конструктивном исполнении QSFP56, 400 Гбит/с – в конструктивном исполнении OSFP, QSFP-DD и QSFP112, а модули пропускной способностью до 800 Гбит/с – в конструктивном исполнении OSFP и QSFP-DD.

Одним из первых стандартов, изданных в 1995 году Комитетом по компактному конструктивному исполнению (форм-фактору) SMFC (Small Form Factor Committee) для сменных приемопередатчиков с возможностью их замены без отключения электропитания, был преобразователь гигабитного интерфейса GBIC (Gigabit Interface Converter). В 2000 году этот стандарт был пересмотрен. Теперь комитет SMFC является частью Ассоциации индустрии сетей хранения данных SNIA (Storage Networking Industry Association).

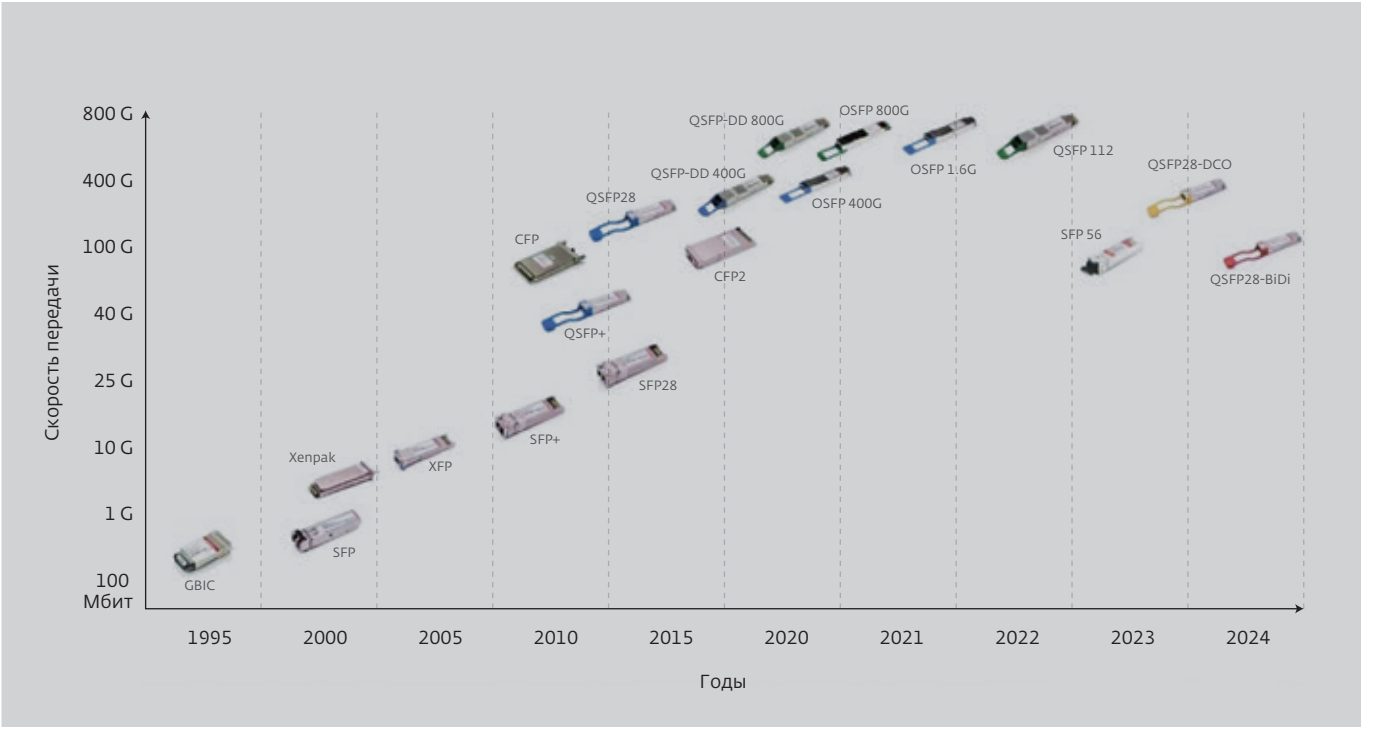

Рис.7. Эволюция сменных оптических модулей приемопередатчиков для подключений и соединений различной пропускной способности

В 2001–2005 годах для подключений с типичными скоростями от 1 Гбит/с для Ethernet и до 4 Гбит/с для Fibre Channel на смену модулям GBIC пришли модули-приемопередатчики в конструктиве SFP (Small Form-factor Pluggable) [21].

Модуль SFP – это сменный оптический модуль приемопередатчика в компактном конструктивном исполнении. Иногда его называют также mini-GBIC преобразователем. В модуле SFP с дальностью связи до 160 км используются такие соединители (разъемы), как LC Duplex, LC Simplex, RJ45 и SC Simplex. Популярность модулей в конструктиве SFP обусловлена, прежде всего, следующими причинами [22]:

- возможность "горячей замены": установки и извлечения модуля без отключения электропитания и прерывания работы коммутатора;
- компактность: высокая плотность портов и большая пропускная способность;
- DDM (Digital Diagnostics Monitoring): функция активного мониторинга таких параметров оптического приемопередатчика, как температура, напряжение и уровень оптической мощности. Мониторинг важен для повышения надежности и качества диагностики, проводимой на основе полученных эксплуатационных данных;
- меньшая стоимость: благодаря массовому производству и широкому ассортименту брендов модули SFP стоят дешевле модулей GBIC.

Согласование характеристик модулей SFP различных производителей регламентирует документ SFP MSA (Multi-Source Agreement), то есть соглашение между несколькими производителями о создании продуктов одинаковой базовой функциональности и работоспособности. Хотя MSA стала признанной организацией по стандартизации в отрасли оптической связи, она не является официальной. Известно, что IEEE (Институт инженеров по электротехнике и электронике) – крупнейшая в мире техническая профессиональная организация, а сообщества IEEE устанавливают стандарты для приемопередатчиков.

В свое время типы интерфейсов оптических приемопередатчиков от разных производителей оборудования отличались разнообразием. Чтобы решить проблему недостаточной совместимости, несколько производителей создали организацию для стандартизации формы и подгонки функций модулей приемопередатчиков, поэтому в дополнение к IEEE возникла организация MSA.

К продуктам, по которым формулируются решения MSA, относятся оптические приемопередатчики, оптоволоконные кабели и другие сетевые устройства. Что

касается оптических приемопередатчиков, то решения MSA определяют не только их конструктивное исполнение (форм-факторы), но и электрический и оптический интерфейсы.

В 2001 году в соответствии с соглашением между компаниями Agilent Technologies и Agere Systems был выпущен сменный оптический модуль приемопередатчика в конструктивном исполнении XENPAK. Это решение было стандартизировано рабочей группой IEEE 802.3 для 10GbE (10 Gigabit Ethernet). Затем был стандартизирован модуль X2, по размерам вдвое меньший, чем XENPAK. В 2003 году этот модуль был освоен в производстве и использовался для передачи данных со скоростью 10 Гбит/с на расстояние более 10 км. Последний раз стандарт для модуля X2 обновлялся в 2005 году.

Стандарт XFP (X Form-factor Pluggable) был анонсирован в 2002 году и принят в 2003-м. Позднее, в 2005 году, стандарт был обновлен. Все модули XFP ориентированы на клиентские подключения 10GbE. Римская цифра "X" в его наименовании обозначает "10". Начиная с 2010 года сменные модули XFP использовались преимущественно для передачи данных на большие расстояния в волоконно-оптических системах передачи (ВОСП).

В 2006 году была представлена улучшенная версия SFP для скорости передачи данных до 10 Гбит/с – модуль SFP+ (Enhanced Small Form-factor Pluggable). Модуль SFP+ поддерживается многими поставщиками сетевых решений и по-прежнему является доминирующим форматом в отрасли. Сменные оптические модули приемопередатчики SFP+ доступны с несколькими типами разъемов: LC Duplex, LC Simplex и RJ45. Последнее обновление стандарта для SFP+ датируется 2013 годом. Передача данных с использованием сменного оптического модуля приемопередатчика SFP+ доступна на скоростях 8, 10 и 16 Гбит/с. Дальность связи для модуля SFP+ находится в пределах от 30 м до 120 км.

Возможны как минимум два варианта SFP+:

- рабочая длина волны 10G SFP+ составляет 1310 нм. С LC-соединителем и одномодовым двухволоконным оптическим патч-шнуром OS2 дальность дуплексной передачи может достигать 10 км;
- рабочая длина волны 10G SFP+ составляет 850 нм. С LC- соединителем и многомодовым двухволоконным оптическим патч-шнуром OM3 дальность дуплексной передачи может достигать 300 м.

Волоконно-оптические кабели, используемые в телекоммуникациях, бывают двух типов – многомодовые и одномодовые. У многомодового волоконно-оптического кабеля префикс "OM", а у одномодового – "OS". В стандартах ISO/IEC 11801 и EIA/TIA упоминаются пять типов многомодовых волоконно-оптических кабелей – OM1, OM2, OM3, OM4 и OM5 и два типа одномодовых – OS1 и OS2. Во всех стандартах к волоконно-оптическим кабелям применяются термины OM/OS [23].

Соединитель (разъем) SC (Subscriber Connector) представляет собой волоконно-оптический разъем в компактном конструктивном исполнении, используется в телекоммуникациях и передаче данных.

Соединитель (разъем) LC (Lucent Connector) также представляет собой волоконно-оптический разъем в компактном конструктивном исполнении, применяется в телекоммуникациях и передаче данных. Он отличается размерами (примерно в два раза меньше SC) и используется для приложений в ЦОДах с высокой плотностью портов [24].

Оптический адаптер LC/UPC (Ultra Physical Contact) SM Duplex предназначен для соединения оптических патч-шнуров с соединителями типа LC с угловой полировкой UPC [25].

Соединитель (разъем) MPO (Multi-Fiber Push-On) – это ленточный многоволоконный разъем. В пластиковом корпусе волокна расположены в один ряд либо в несколько в зависимости от плотности кабеля. На одной из сторон корпуса есть ключ, который определяет полярность разъема. Наиболее распространены модификации с 12 (MPO-12), 16 (MPO-16) и 24 (MPO-24) волокнами, возможны варианты с 48 (четыре ряда по 12 волокон) и 72 (шесть рядов по 12 волокон) волокнами, но у них ограниченные варианты применения. Важная особенность MPO состоит в том, что волокна центрированы не в адаптере, а за счет штырей и отверстий. Адаптер выполняет только функцию фиксации разъемов [26].

RJ-45 (а также RJ45S) – это устаревший разъем, который предназначался для реализации интерфейса высокоскоростных модемов [27].

Приемопередатчики QSFP (Quad Small Form-factor Pluggable), которые немного больше модулей SFP, были выпущены в 2006 году. Их применение позволяет передавать данные по многомодовому или одномодовому оптическому кабелю в четыре раза быстрее, а именно при подключении четырех компонентных сигналов с использованием разъемов LC Duplex и MPO-12, со скоростью до 4 Гбит/с и с дальностью связи до 10 км.

В 2009 году был выпущен сменный оптический модуль приемопередатчика CFP. Стандарт CFP (C Form-factor Pluggable) изначально разрабатывался для сверхвысокоскоростных решений для высокоскоростного Интернета – конкретно для 100-гигабитных систем (римская цифра "C" означает "100"). Один сигнал 100 Гбит/с (например, 100GbE в стандарте Ethernet или OTU4 в стандарте OTN) передается с использованием:

- десяти компонентных сигналов пропускной способностью 10 Гбит/с каждый или
- четырех компонентных сигналов пропускной способностью 25 Гбит/с каждый.

В 2012 году технические требования к модулю CFP были уточнены, а в 2014-м выпущены сменные модули CFP2 и CFP4 с меньшими физическими размерами и с улучшенными параметрами.

Физические размеры сменного модуля CFP2, который обеспечивает скорость передачи данных от 100 до 200 Гбит/с на расстояния от 10 до 2000 км в магистральных системах дальней связи с оптическими усилителям, составляют половину физического размера CFP. Оптические модули CFP2 снабжены разъемами LC Duplex и используются для дуплексной передачи данных по двум одномодовым оптическим волокнам. Модули поддерживают передачу данных по четырем компонентным каналам в обоих направлениях с пропускной способностью 25 Гбит/с каждый, обеспечивая при этом совокупную пропускную способность более 100 Гбит/с. Модификации оптических интерфейсов: 100GBase-LR4 на 10 км и 100GBase-ER4 на 40 км.

Оптические модули CFP4 в два раза меньше приемопередатчиков CFP2 и составляют четверть физического размера исходного стандарта CFP. Модули CFP4 снабжены разъемами LC Duplex и используются для дуплексной передачи данных по двум одномодовым оптическим волокнам. Модули поддерживают подключение по четырем компонентным каналам с пропускной способностью 25 Гбит/с в обоих направлениях, обеспечивая при этом совокупную пропускную способность 100 Гбит/с при дальности связи до 10 км, что соответствует решениям CFP4 MSA [28].

Выпущенный в 2012 году модуль QSFP+ (Enhanced Quad Small Form-factor Pluggable) представляет собой 4-канальный компактный сменный оптический приемопередатчик, поддерживающий четыре компонентных потока, с возможностью его установки в оборудование без отключения электропитания, а также соединители (разъемы) LC Duplex и MPO-12.

Модуль QSFP+ – это основное решение в виде сменного модуля приемопередатчика для скорости передачи данных 40 Гбит/с. Оптический модуль 40G QSFP SR4 обеспечивает подключение на длине волны 850 нм с дальностью связи:

- до 100 м при использовании многомодового волоконно-оптического волокна OM3;
- 150 м при использовании многомодового волоконно-оптического волокна OM4.

Как и модуль QSFP, он превосходит по размерам оптические трансиверы SFP+, но обеспечивает дальность связи до 40 км [29].

В 2014 году был выпущен модуль QSFP28, который является стандартным решением приемопередатчика с разъемами LC Duplex и MPO-12 для подключений на уровне 100 Гбит/с. Модуль QSFP28 имеет такие же физические размеры и изготавливается на основе той же технологии, что и модуль QSFP+. Его отличие состоит в том, что для подключения 100G используются четыре компонентных сигнала по 25 Гбит/с.

Решение QSFP28 доступно для нескольких модификаций оптических интерфейсов [22]:

- 100GBASE-SR4: с дальностью связи на длине волны 850 нм порядка 70 м при использовании многомодового волокна MMF OM3 и 100 м в случае многомодового волокна MMF OM4;
- 100GBASE-LR4: с дальностью связи порядка 10 км, с разъемами LC Duplex и передачей компонентных сигналов по одномодовому (SMF) волоконно-оптическому кабелю на CWDM длинах волн 1270/1290/1310/1330 нм;
- 100GBASE-ZR: с дальностью связи порядка 80 км, с разъемами LC Duplex и передачей компонентных сигналов по одномодовому (SMF) волоконно-оптическому кабелю в диапазоне 1310 нм (Coherent Light) на длинах волн 1295.56/1300.05/1304.58/1309.14 нм с использованием технологии WDM.

Сменные двунаправленные BiDi-модули QSFP28 BiDi с 2024 года поддерживают двустороннюю приемопередачу потока данных 100 Гбит/с по одному одномодовому (SMF) оптическому волокну на расстояние до 70 км.

В 2014 году был выпущен сменный модуль SFP28 тех же физических размеров, что и SFP. Эти модули с разъемами LC Duplex и Simplex ориентированы на волоконно-оптические соединения по одномодовому или многомодовому волокну с использованием четырех компонентных потоков данных по 25 Гбит/с каждый с дальностью связи от 100 м до 40 км.

В 2018 году появились сменные двунаправленные BiDi модули CSFP (Compact Size SFP), которые поддерживают передачу двух потоков по 1 Гбит/с (1000 Мбит/с) каждый на расстояние до 20 км.

Выпущенный в 2019 году сменный модуль QSFP56 позволил удвоить, по сравнению с QSFP28, скорость передачи данных и довести ее до 200 Гбит/с.

В модуле QSFP56 этот результат достигается путем передачи:

- восьми компонентных потоков 25 Гбит/с по восьми парам параллельных многомодовых оптических волокон;
- восьми компонентных потоков 25 Гбит/с по восьми оптическим каналам (длинам волн) по одной паре одномодовых оптических волокон с использованием технологии WDM;
- четырех компонентных потоков 50 Гбит/с по четырем парам параллельных многомодовых

оптических волокон с использованием внутреннего мультиплексора для создания потоков 50 Гбит/с с форматом модуляции PAM4.

Оптический модуль QSFP56 доступен в различных конфигурациях (QSFP56 MSA, IEEE 802.3bs) и обеспечивает передачу потока 200 Гбит/с через интерфейс:

- 200G SR4 на длине волны 850 нм с разъемом MPO-12 по восьми многомодовым волокнам (MMF) OM3 с форматом модуляции OOK и NRZ при использовании четырех двунаправленных компонентных потоков 50 Гбит/с на расстояние до 170 м по многомодовому кабелю MMF OM3 или на расстояние до 100 м по многомодовому кабелю MMF OM4;
- 200G LR4 на длине волны 1300 нм с разъемами LC Duplex по восьми одномодовым волокнам (SMF) с форматом модуляции OOK и PAM4, при использовании четырех двунаправленных компонентных потоков 50 Гбит/с на расстояние до 10 км.

Представленный в 2019 году сменный модуль QSFP-DD (Quad Small Form-factor Pluggable Double Density) совместим с другими версиями QSFP. Он обеспечивает высокоскоростные решения с помощью дополнительного ряда контактов для электрического подключения восьми компонентных сигналов 100G. При использовании модуля QSFP-DD с разъемами LC и MPO-16 скорость передачи данных достигает 800 Гбит/с.

В 2019 году появился сменный модуль OSFP (Octal Small Form Factor Pluggable), поддерживающий подключения со скоростью передачи данных от 400 Гбит/с. Благодаря большим размерам и лучшему температурному режиму, модуль OSFP – альтернатива модулю QSFP-DD, если необходимо обеспечить более высокую пропускную способность. Это решение особенно востребовано в ЦОДах и используется для приложений с высокими энергопотреблением и плотностью интерфейсов.

В числе последних решений MSA – компактный и один из самых миниатюрных по конструктивным размерам сменный модуль SFP-DD (Small Form-factor Pluggable Double Density). Это решение дало возможность ЦОДам удвоить плотность портов, а также увеличить скорость передачи данных. В модуле MSA SFP-DD используются компонентные сигналы 50 Гбит/с с форматом модуляции PAM4, поддерживаются два канала по 100G каждый. Это более дешевое решение для ЦОДов с высокой плотностью установки интерфейсов в конструктивном исполнении QSFP+/QSFP28/QSFP56. Кроме того, поддерживаются подключения 200G с двумя компонентными сигналами 100G и форматом модуляции PAM4. Дальность связи варьируется в пределах от 500 м до 10 км.

В 2021 году был выпущен сменный модуль QSFP-DD800 (Quad Small Form-factor Pluggable Double Density 800G) в соответствии со стандартом QSFP-DD. Это позволило удвоить скорость передачи данных до 800 Гбит/с при использовании восьми компонентных сигналов по 100 Гбит/с с форматом модуляции PAM4 каждый. Стандарт QSFP-DD поддерживает приложения для ЦОДов с высокой плотностью интерфейсов и совместим с разъемами LC Duplex и MPO-16.

Предложенный также в 2021 году сменный модуль QSFP112 (Quad Small Form-factor Pluggable 112G) относится к следующему поколению семейства QSFP. В QSFP112 поддерживаются четыре компонентных сигнала пропускной способностью 100G (112 Гбит/с) каждый. По конструктивному исполнению модуль QSFP112 совместим с модулями QSFP56 и QSFP28.

Optical Internetworking Forum (OIF) анонсировал пять новых проектов, рассчитанных на скорости компонентных потоков 100G (112 Гбит/с), что сделало возможным решение четвертого поколения с одним компонентным сигналом 100G для клиентского подключения 100GbE.

В 2022 году были обновлены стандарты на существующие модули SFP28, QSFP28 и QSFP-DD:

- для QSFP-DD обеспечена более высокая пропускная способность;
- для QSFP28 представилась возможность модернизации существующих сетей с каналами 10/40G до сетей с каналами 100G без изменения сетевой инфраструктуры.

В 2023 году появилось большое количество сменных модулей QSFP28. Кроме того, был налажен выпуск приемопередатчиков 100G по технологии Coherent Light (O-Band DWDM) и когерентных оптических модулей 400G ZR. Приемопередатчики 100G в O-Band DWDM поддерживают передачу данных на расстояние до 30 км без использования на оптических участках сети OTS (Optical Transport Section) модулей компенсации дисперсии DCM (Dispersion Compensation Module) или оптических усилителей OA (Optical Amplifier).

Представленный в 2024 году модуль SFP56 – компактное решение для приложений 50 Гбит/с Ethernet с одним компонентным сигналом 50G. Модуль SFP56 поддерживает формат модуляции PAM4, совместим с существующими решениями SFP+. SFP28 и обеспечивает дальность передачи до 100 м с использованием многомодового волокна MMF (интерфейс SR)

и 10 км с использованием одномодового волокна SMF (интерфейс LR).

В прошлом году появились более совершенные сменные оптические модули для каналов пропускной способностью 800 Гбит/с. Последние варианты поддерживают конфигурации с восемью или четырьмя компонентными сигналами со скоростью передачи данных 100 или 200 Гбит/с по каждому компонентному каналу и с форматом модуляции PAM4. Эти приемопередатчики обеспечивают дальность связи от 100 м (интерфейс SR) до 2 км (интерфейс FR).

В конце 2024 года стали доступны сменные оптические модули в конструктивном исполнении OSFP для каналов пропускной способностью 800 Гбит/с, обеспечивающие реализацию соединений высокой пропускной способности и плотность интерфейсов, необходимых для приложений ИИ.

Преимущества решения OSFP заключаются в следующем:

- физические размеры 100,4×22,58×13,0 мм, что обеспечивает реализацию высоких характеристик в ограниченном пространстве;
- пропускная способность 800 Гбит/с благодаря подключению через восемь двунаправленных компонентных соединений по 100 Гбит/с каждое (интерфейс DR8);
- подключение на расстояние до 500 м по одномодовому волокну SMF;
- энергосберегающее решение с ограничением 15 Вт на модуль, то есть с адаптивным, регулируемым в зависимости от рабочих нагрузок, энергопотреблением и надлежащим охлаждением;
- совместимость с существующими сменными модулями приемопередатчиков;
- возможность замены модуля без отключения электропитания, что обеспечивает простоту обслуживания;
- эффективная стратегия охлаждения, то есть высокая надежность при работе с большой нагрузкой;
- высокая масштабируемость в эпоху вычислений на фоне растущих требований к пропускной способности.

В настоящее время для подключений пропускной способностью 400, 800 и даже 1600G есть возможность использовать модули в конструктивном исполнении QSFP-DD, OSFP и SFP-DD.

Примером решения следующего поколения для сетей взаимодействия ЦОДов в облачной сетевой инфраструктуре с поддержкой генеративного ИИ (GenAI) являются сменные оптические модули компании Marvell, использующие восемь компонентных сигналов 200 Гбит/с с форматом модуляции PAM4. Модуль с интерфейсами DR8/DR4.2/2xFR4/FR8/LR8, который производится с использованием технологии КМОП по технологическому процессу 3 нм, позволяет [30]:

- удвоить пропускную способность модуля в конструктивном исполнении OSFP/QSFP-DD до 1,6 Тбит/с;
- обеспечить дополнительный запас по коэффициенту битовых ошибок (BER) за счет конкатенированной прямой коррекции ошибок (cFEC).

С появлением компонентных каналов пропускной способностью 400 Гбит/с сменный модуль приемопередатчика упростится, но обеспечить дальность связи до 10 км будет сложнее. На Глобальном саммите OFC-2025 (30 марта – 3 апреля 2025 года, Moscone Center, г. Сан-Франциско, США) компании Marvell, Lumentum и TeraHop продемонстрировали возможность использования компонентных каналов пропускной способностью 400 Гбит/с (символьная скорость 224 ГБод) с форматом модуляции PAM4. Как утверждают представители компаний, это позволит значительно увеличить производительность, улучшить характеристики ЦОДов, а также повысить эффективность облачной сетевой архитектуры и сократить время, необходимое для обучения ИИ и решения других сложных задач [31].

В перспективе с использованием когерентных оптических решений типа Coherent lite будут разработаны оптические сменные модули приемопередатчиков для соединений увеличенной дальности связи и пропускной способности 1,6 и 3,2 Тбит/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 (дата обращения 18.04.2025).
2. 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).
3. 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).
4. 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).
5. 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/568373e2f427e0f7a5f4dff6d049c 432eb057149/pdf/Epson-Lightwave_webinar.pdf (дата обращения 18.04.2025).
6. Get to know us. [Электронный ресурс]. URL: https://www.commscope.com/about-us/ (дата обращения 18.04.2025).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. **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)
12. **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).
13. EML и DML: в чем отличия? [Электронный ресурс]. URL: https://skeo.ru/articles/eml-i-dml-v-chjom-otlichiya (дата обращения 18.04.2025).
14. 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://anlan.ru/articles/chto-nahoditsya-v-opticheskom-module?srsltid=AfmBOorezZd8How3C_N 90iHKCM45JawvAc-PekefZ3gT19MsBSIKaQCO (дата обращения 22.05.2025).
22. Что такое модуль SFP? И в чем разница между SFP, SFP+, SFP 28, QSFP+, QSFP 28, 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).

Организатор:

окружной выставочный центр
• ЮГОРСКИЕ КОНТРАКТЫ •

Техническая поддержка:

EXPOTECH

MEMBER OF THE RUSSIAN UNION OF EXHIBITIONS AND FAIRS

ЧЛЕН РОССИЙСКОГО СОЮЗА ВЫСТАВОК И ЯРМАРОК

30 МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ВЫСТАВКА

СУРГУТ. НЕФТЬ И ГАЗ 2025

30th INTERNATIONAL SPECIALIZED TECHNOLOGICAL EXHIBITION

SURGUT. OIL & GAS 2025

24-26 СЕНТЯБРЯ

г. Сургут,
СОК «Энергетик»
ул. Энергетиков, 47

+7 (3462) 94-34-54
sales@yugcont.ru
sngexpo.ru

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/?srsltid=AfmBOop 1akkeoypp 5HTqLLDM_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/CFP 2/CFP 4/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).

7–10 октября 2025

XIV Петербургский международный **ГАЗОВЫЙ ФОРУМ**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ЭКСПОФОРУМ

РЕКЛАМА 18+

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА

Минпромторг России

Министерство энергетики Российской Федерации

Правительство Санкт-Петербурга

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

Газпром

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР

ТМК

ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ПАРТНЕР

Алмаз - Антей

ПАРТНЕРЫ

Газпромбанк

Комита

Газпром недра

Росатом

ГМС Группа

ОМК

Салаватский Катализаторный Завод

Газпром газораспределение

ОДК

РУМО

Фракджет-Волга

Норрексим

ОСК

Fplus

Мосгаз

Газстройпром

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР

Ростелеком Бизнес

ОФИЦИАЛЬНЫЙ СТРАХОВОЙ ПАРТНЕР

согаз

ГТ Энерго

РНГ-Инжиниринг

Акционерное общество «НПО «ПОЛИЦЕЛЛ»

Метран

АБС Электро

ОРГАНИЗАТОР

10 EXPOFORUM

GAS-FORUM.RU

САМАЯ АКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПМГФ – В TELEGRAM-КАНАЛЕ @GASFORUMSPB

ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ

Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru

Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.su

Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphera.ru

Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.su

Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.su

Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.su