Транспортные ВОСП большой пропускной способности

Часть 2. Эволюция когерентных цифровых сигнальных процессоров

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.120.4.38.42

В цикле статей представлены международные отраслевые стандарты для открытых линейных интерфейсов 400G со сменными когерентными оптическими модулями-приемопередатчиками (трансиверами) транспортных волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) OTN/DWDM (часть 1), эволюция поколений когерентных цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) для высокоскоростных оптических каналов (длин волн) ВОСП (часть 2), а также эволюция технологий, используемых для изготовления когерентных ЦСП для ВОСП (часть 3).

Введение

Масштаб новых крупных приложений искусственного интеллекта (ИИ, Artificial Intelligence, AI) расширяется в геометрической прогрессии, а количество обрабатываемых ими параметров увеличивается в 1000 раз каждые два-три года. Ключевым аспектом развития ИИ является пропускная способность оптических каналов, которая, как ожидается, возрастет с 200/400/800 Гбит/с сегодня до более чем 1 Тбит/с в ближайшем будущем. Рост трафика в сетях ИИ поддерживается путем увеличения не только размеров сетевых кластеров, но и пропускной способности оптических каналов (длин волн) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) OTN/DWDM.

Оптические когерентные решения стали применяться на высокоскоростных ВОСП более десяти лет назад, и каждый год становится известно о новых инновационных достижениях в этой области. В то время как передача с прямым обнаружением сигнала, применяемая ранее для оптических каналов 2,5/10G, использует только амплитуду или интенсивность оптического излучения, когерентная оптическая передача манипулирует тремя свойствами света: амплитудой, фазой и поляризацией. Это позволило повысить пропускную способность оптических каналов без ущерба для дальности передачи.

Прогнозы развития высокоскоростных решений для ВОСП

За последнее десятилетие скорость Ethernet увеличилась в четыре раза – до 400GbE. С наступлением эры 800GbE возникли планы по внедрению Terabit Ethernet, то есть 1,2 или 1,6 и 3,2 TbE.

Ниже представлены данные по стандартизации клиентских интерфейсов Ethernet:

- 10-гигабитный Ethernet (10GbE) – IEEE 802.3-2005 (оптический),
- 10-гигабитный Ethernet (10GbE) – IEEE 802.3an-2006 (витая пара),
- 40-гигабитный Ethernet (40GbE) – IEEE P802.3ba Ethernet Task Force (2007–2011 годы),

- 100-гигабитный Ethernet (100GbE) – IEEE P802.3ba Ethernet Task Force (2007–2011 годы),
- 200-гигабитный Ethernet (200GbE) – IEEE 802.3bs (2016–2018 годы),
- 400-гигабитный Ethernet (400GbE) – IEEE 802.3bs (2016–2018 годы),
- 800-гигабитный Ethernet (800GbE) – IEEE 802.3ck (2020 год),
- 1600-гигабитный Ethernet (1,6 TbE) – IEEE P802.3df (в стадии рассмотрения).

Кроме того, в порядке расширения стандартных приложений для физического уровня Ethernet в OIF, начиная с 2015 года, разрабатывается технология FlexE, включающая механизм формирования циклов/кадров FlexE (см. также рекомендации МСЭ-Т G.8312 "Интерфейсы для городской транспортной сети") в группах физических уровней Ethernet со скоростью более 400 Гбит/с. Организация IEEE 802.3 продолжает разрабатывать стандарты для Ethernet подключений пропускной способностью, превышающей 400 Гбит/с.

Прогнозируется, что к 2025 году пропускная способность большинства каналов в сетях ИИ составит 800 Гбит/с, а к 2027-му – 1,6 Тбит/с [1].

Хотя до 2025–2026 годов не следует ожидать широкого коммерческого внедрения решений Terabit Ethernet, уже возникла потребность в изучении различных вариантов достижения рубежа в 3,2 Тбит/с. Продиктовано это прогнозируемым экспоненциальным ростом трафика в решениях для ИИ и нарастающими проблемами с энергопотреблением и стоимостью решений при переходе к более высоким скоростям передачи.

Прогресс в развитии когерентных решений для оптических телекоммуникационных сетей высокой пропускной способности с минимальной задержкой сигнала и исключением перегрузки сети обеспечит [2]:

- бесперебойную потоковую передачу видеоконтента высокой четкости,
- сверхбыстрый доступ в Интернет,
- бесперебойную голосовую связь,
- хранение, обработку и распределение данных для поставщиков услуг облачных вычислений,
- решения для сетей взаимодействия между ЦОДами,
- получение новых результатов научных исследований в сфере астрономии, геномики (раздел молекулярной генетики по изучению генома и генов живых организмов, всей совокупности генов организма или значительной их части), физики элементарных частиц и т. п.

Появление сменных оптических когерентных модулей-передатчиков 400G позволило снизить энергопотребление и затраты, одновременно открыв новые возможности для применения сменных когерентных линейных модулей-приемопередатчиков непосредственно на маршрутизаторах в сетях, реализующих принцип IP over DWDM (IPoWDM) [3]. Переход к когерентным ВОСП с оптическими каналами пропускной способностью 800 Гбит/с, 1,2/1,6 или 3,2 Тбит/с открывает дополнительные возможности. Новейшие ЦСП позволяют значительно улучшить характеристики как встроенных решений, так и сменных модулей-приемопередатчиков, которые ранее могли быть реализованы только как встроенные решения. Но при таких сверхвысоких скоростях передачи данных необходимо обеспечить целостность сигнала и снижение уровня шумов (помех), что потребует модернизации существующей сетевой инфраструктуры.

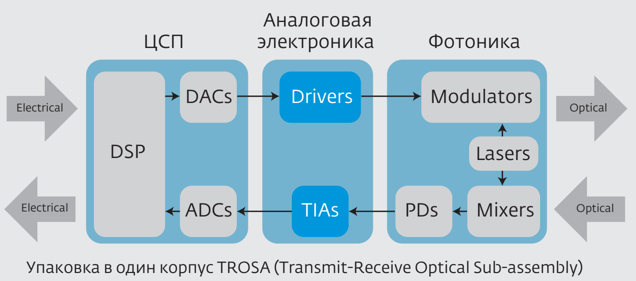
"Стоимость каждого переданного бита данных" больше не является единственным критерием, определяющим успех перехода на более высокие скорости передачи. Важным фактором, особенно для операторов ЦОДов, становится потребление электроэнергии [4]. Актуальна задача по передаче данных с еще более высокой скоростью на большие расстояния с меньшим энергопотреблением. Следует отметить, что разработчики последовательно снижают объем энергопотребления когерентных интерфейсов из расчета на каждый передаваемый Гбит/с [5]:

- от 200 Гбит/с, дальность 600 км, 0,75 Вт/Гбит/с к 200 Гбит/с, дальность от 2000 (Turcsell, ZTE) до 2800 км (ZTE) и к 400 Гбит/с, дальность до 3500 км (Infinera), 0,15 Вт/Гбит/с,
- от 800 Гбит/с, дальность 1000 км, 0,2 Вт/Гбит/с к 800 Гбит/с, дальность порядка 2000 км (Nokia) и 3000 км (Infinera), 0,15 Вт/Гбит/с.

Необходимость компромисса между скоростью передачи данных и энергопотреблением означает, что существуют различные потенциальные пути реализации Terabit Ethernet в зависимости от сетевой архитектуры и доступного бюджета затрат. В любом случае предполагаются значительные инвестиции в аппаратное и программное обеспечение, включая решения по контролю и управлению сетью.

Классификация когерентных оптических решений

Переход к когерентным форматам модуляции связан со значительным увеличением пропускной способности ВОСП. Пропускная способность оптических каналов ВОСП увеличилась с 10 до 100 Гбит/с, затем до 200, 400, 600, 800 Гбит/с и даже до 1,2/1,6 Тбит/с. Пропускная способность ВОСП для С-диапазона



Источники:
https://cyberleninka.ru/article/n/kogerentnye-tehnologii-dlya-dwdm-setey-dalney-svyazi-perehodya-granitsu-v-10g/viewer;
https://www.precisionot.com/whats-in-a-coherent-pluggable/

Рис.1. Функциональная схема когерентных оптических линейных интерфейсов DCO (Digital Coherent Optics) [6]

4,8 ТГц возросла с 960 Гбит/с (например, 96×10 Гбит/с) до 9,6 Тбит/с (например, 96×100 Гбит/с), а при переходе к каналам 800G – до более чем 40 Тбит/с (например, 53×800 Гбит/с).

В когерентные оптические линейные интерфейсы DCO (Digital Coherent Optics) входят три основных строительных блока высокого уровня:

- цифровой сигнальный процессор (ЦСП),
- аналоговая электроника,
- фотоника.

Аналоговая электроника и фотоника часто объединяются в виде приемопередающего оптического узла TROSA (Transmit-Receive Optical sub-assembly). Вместе с радиочастотными соединениями и корпусом эти три основных строительных блока составляют единый оптический интерфейс (рис.1).

Кремниевая фотоника станет доминирующей технологией в эпоху LSI (large-scale integration) при развитии успеха оптики с совместной упаковкой CPO (Co-Packaged Optics). Под совместной упаковкой CPO понимается интеграция оптических компонентов непосредственно в тот же корпус, что и электронной интегральной схемы, например ЦСП. К таким компонентам относятся прежде всего лазеры, модуляторы и фотоприемники.

Co-packaging Optics – это инновационная реализация сменных модулей-приемопередатчиков (трансиверов), в которых используется технология SCIP™ (Broadcom Silicon Photonics Chiplets in Package). Оптические элементы размещаются непосредственно на подложке чипа, а конструктивное исполнение (форм-фактор) совместной упаковки максимально сокращает длину электрических соединений [7]. Сочетание фотонных интегральных схем InP PIC на основе фосфида индия (InP) с современными цифровыми сигнальными процессорами ЦСП КМОП на кремниевой основе обеспечит высокую скорость передачи данных по оптическим каналам волоконно-оптических систем передачи [8].

Аналоговая электроника

В направлении передачи драйверы принимают низкое напряжение от ЦАП и преобразуют его в более высокое напряжение, необходимое для работы модулятора.

В направлении приема трансимпедансные усилители (TIA) принимают малые токи от фотодетекторов и преобразуют их в напряжения, необходимые для работы АЦП.

Блок аналоговой электроники, обычно упакованный в одну СБИС, изготовлен из материала, отличного от кремниевой КМОП-технологии, используемой для ЦСП. Например, в когерентных оптических интерфейсах аналоговые СБИС изготовлены на основе технологии SiGe (Silicon-Germanium).

Фотонный блок (Фотонная интегральная схема) PIC

Производители коммуникационных компонентов и оборудования могут выбирать материал для своих PIC из двух вариантов: InP или кремний. Предварительно взвешиваются их достоинства и недостатки. Ключевые функции передачи обеспечивают лазер и модулятор:

- лазер, генерирующий свет необходимой частоты, всегда изготавливается из фосфида индия (InP). Компания EFFECT Photonics, ведущий мировой разработчик высокоинтегрированных оптических решений, в октябре 2023 года объявила об успешной проверке своего перестраиваемого лазера InP, основного компонента pITLA (Pico Integrated Tunable Laser Assembly), полностью интегрированного в фотонную интегральную схему PIC (Photonic Integrated Circuit). Перестраиваемые лазеры – основной компонент когерентных оптических систем DWDM. Перестраиваемая интегральная схема PIC на основе InP успешно прошла серию испытаний, продемонстрировав требуемые характеристики, указанные в стандарте IEEE Std. 802.3-2022, 100GBASE-ZR. В отличие от доступных в настоящее время перестраиваемых лазерных сборок, ядром цифрового решения pITLA EFFECT Photonics является перестраиваемый лазер, полностью реализованный в виде монолитного интегрированного InP PIC [9];

- излучение лазера передается в модулятор. Используя электрическое поле для изменения показателя преломления материала, через который проходит свет, модулятор кодирует данные, корректируя фазу и уровень мощности оптического излучения. Поскольку для управления амплитудой и фазой необходима пара сдвинутых по фазе модуляторов Маха – Цендера, для когерентной передачи требуются четыре модулятора Маха – Цендера, по два на каждую поляризацию оптического сигнала. Работа модулятора Маха – Цендера (ММЦ) основана на использовании интерферометра Маха – Цендера и электрооптического эффекта Поккельса. Интерферометр Маха – Цендера был разработан физиками Людвигом Махом и Людвигом Цендером. Для оптических модуляторов в составе PIC предпочтительными материалами являются фосфид индия и ниобат лития, что открывает перспективу достижения символьной скорости 200 ГБод и выше. По мнению исследователей, у фосфида индия значительные преимущества перед другими решениями.

На отраслевых конференциях OFC и ECOC рассматривались также такие новые материалы, как органические плазмонные модуляторы (organic plasmonic modulators) и графеновые фотодетекторы (graphene photodetectors), которые открывают перспективу перехода к когерентным решениям с терабитной символьной скоростью порядка 1000 ГБод.

Следует отметить, что интеграция сотен ранее дискретных фотонных компонентов в единой СБИС PIC позволяет сделать производство одной PIC значительно более рентабельным, чем изготовление множества отдельных оптических компонентов с последующей их интеграцией.

Интеграция PIC дает возможность миниатюризировать оптические устройства и снизить энергопотребление. Еще одно преимущество – снижение потерь оптической связи за счет замены дискретных компонентов на волноводы, которые соединяют оптические функциональные элементы внутри PIC.

Цифровой сигнальный процессор

Цифровой сигнальный процессор (ЦСП, Digital Signaling Processor, DSP) – это электронное сердце систем когерентной передачи. Фундаментальной функцией ЦСП является кодирование электронных цифровых данных по амплитуде, фазе и поляризации нормированного оптического излучения на передающей стороне и декодирование этих данных на приемной стороне канала. В ЦСП выполняются аналого-цифровое преобразование (и наоборот) сигнала, обнаружение и исправление ошибок (FEC), шифрование данных и контроль параметров системы.

В кремниевой цифровой КМОП СБИС используются самые современные технологии (например, пленки 7 нм с последующим развитием до 5 нм, затем до 3 нм и т. д.) для цифро-аналогового (DAC) и аналого-цифрового преобразования (ADC), а также цифровой обработки сигналов по направлениям приема и передачи, включая обнаружение и исправление ошибок, мультиплексирование, шифрование, мониторинг характеристик и т. п.

В новых реализациях ЦСП обеспечивается также вероятностное формирование PCS (Probabilistic Constellation Shaping) точек созвездия формата модуляции QAM, что позволяет повысить устойчивость к нелинейным взаимодействиям каналов и увеличить дальность связи [10].

Требования к когерентным ЦСП различаются для встроенных в оборудование решений и для сменных модулей-приемопередатчиков [3, 11]. По мнению экспертов Cignal AI, классифицировать ЦСП необходимо по максимальной символьной скорости передачи, определяемой в Бодах (количество символов, передаваемых за секунду, Baud rate). Единица Бод (Baud) названа в честь Эмиля Бодо, изобретателя телеграфного кода Бодо, и представлена в соответствии с правилами для единиц СИ. То есть первая буква его символа заглавная (Bd).

Более высокая символьная скорость связана с расширением частотного спектра оптического канала и обеспечивает, в сочетании со снижением уровня формата модуляции QAM, достижение максимальной скорости передачи данных по мере увеличения дальности связи без промежуточного ОЕО преобразования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dell'Oro Group.report "AI Networks for AI workloads". Press Release January 16, 2024 [Электронный ресурс]. URL: https://www.delloro.com/news/ai-workloads-require-new-network-buildouts-expanding-data-center-switch-market-by-50-percent/ (дата обращения 26.04.2024).
2. OFC-2024. A Hybrid Conference – In-Person and Virtual Presentations. San Diego Convention Center, San Diego, California, USA. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ofcconference.org/en-us/home/exhibition-and-show-floor-programs/ (дата обращения 26.04.2024).
3. **Коган С.С.** Транспортные волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) большой пропускной способности. Часть 1 // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2024. № 2. С. 44–54.
4. LightReading. Optical Networking Digital Symposium / 15.02.2024. Simon Stanley, Analyst at Large, Heavy Reading [Электронный ресурс]. URL: https://event.on24.com/eventRegistration/EventLobbyServlet?target=reg20.jsp&eventid=4412886&sessionid=1&key=76BA13B2D950221AFBD8C68B4420BBE5&groupId=5107640&sourcepage=register?partnerref (дата обращения 26.04.2024).
5. Building Open Optical Right – Enabling the Network for the Next Decade, or More… [Электронный ресурс]. URL: https://www.infinera.com/blog/building-open-optical-right-enabling-the-network-for-the-next-decade-or-more/tag/optical/?mkt_tok=MjY0LUhCUS03MTQAAAGSANJnyW801Lo7rON-01X34CLCwUXYuXkqM23bOtgyDk1Ga-xYRPMo1Ioif3yvkiMayDr8tqN9UfCbmeOojVxhdgcNxm8PLx9Mq3cx-8E8EJ (дата обращения 26.04.2024).
6. Когерентные технологии для DWDM-сетей дальней связи. Переходя границу в 10G [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kogerentnye-tehnologii-dlya-dwdm-setey-dalney-svyazi-perehodya-granitsu-v-10g/viewer/. (дата обращения 26.04.2024).
7. Оптический трансивер против оптического двигателя и CPO против OBO [Электронный ресурс]. URL: https://www.fibermall.com/ru/blog/optical-transceiver-engine-cpo-obo.htm. (дата обращения 26.04.2024).
8. Enabling coherent optical communication with InP PICs [Электронный ресурс]. URL: https://compoundsemiconductor.net/article/117727/Enabling_coherent_optical_communication_with_InP_PICs. (дата обращения 26.04.2024).
9. EFFECT Photonics Verifies Fully Integrated InP PIC for World's Smallest Digital ITLA for Coherent Applications. URL: https://effectphotonics.com/press-releases/worlds-smallest-digital-itla-for-coherent-applications/. (дата обращения 26.04.2024).
10. What's Inside a Coherent DSP? [Электронный ресурс]. URL: https://effectphotonics.com/insights/whats-inside-a-coherent-dsp/ (дата обращения 26.04.2024).
11. Cignal AI (Active Insight). 400ZR vs 800G – Classifying Coherent Technology. [Электронный ресурс]. URL: https://cignal.ai/2021/10/400zr-vs-800g-classifying-coherent-technology/ (дата обращения 26.04.2024).

Окончание части 2 будет опубликовано в следующем номере журнала.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ

СФ Совет Федерации

Минпромторг России

Минцифры России

17–19 СЕНТЯБРЯ 2024
МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ
КВЦ «ПАТРИОТ»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНГРЕСС

ИНВЕСТИЦИИ • КАДРЫ • ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛЬЯНСЫ
ЛИДЕРСТВО В НОВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УКЛАДЕ

РУССОФТ
АССОЦИАЦИЯ РАЗРАБОТЧИКОВ И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
АССОЦИАЦИЯ ЭКСПОРТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА
КОНГРЕССCОЮЗ круговорот событий
МКВ ОФИЦИАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ПАРТНЕР

ТЕХКОНГРЕСС.РФ

ТЕЛЕФОН