

УДК 621.395.741

С.С. Коган¹, О.Е. Наний^{1,2}, В.Н. Трещиков¹

¹ООО «Т8», Москва, Российская Федерация

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ OTN/DWDM

ЧАСТЬ 2. ДАЛЬНОСТЬ СВЯЗИ, СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И СИМВОЛЬНАЯ СКОРОСТЬ

В цикле статей представлены аналитические материалы по пропускной способности и эволюции форматов модуляции оптических каналов ВОСП OTN/DWDM (часть 1), по дальности связи, спектральной эффективности и символьной скорости оптических каналов ВОСП OTN/DWDM (часть 2).

S.S. Kogan¹, O.E. Nani^{1,2}, V.N. Treshchikov¹

¹T8 LLC, Moscow, Russian Federation

²Faculty of Physics, Moscow Lomonosov University, Moscow, Russian Federation

HIGH-SPEED OPTICAL CHANNELS OF ADVANCED OPTICAL TRANSPORT NETWORKS OTN/DWDM

PART 2: COMMUNICATION RANGE, SPECTRAL EFFICIENCY AND SYMBOL RATE

The series of articles presents analytical materials on the throughput and evolution of modulation formats of OTN/DWDM optical channels (part 1), on the communication range, spectral efficiency and symbol rate of OTN/DWDM optical channels (part 2).

Введение

Двумя важными направлениями развития волоконно-оптической связи являются следующие: увеличение пропускной способности и дальности передачи по каналам оптических транспортных систем

OTN/DWDM. В первой части статьи рассмотрена эволюция форматов модуляции оптических каналов, обеспечивающая быстрый рост пропускной способности ВОСП OTN/DWDM. Показано, что переход к форматам модуляции более высокого порядка увеличивает достижимую скорость передачи информации, но ограничивает максимальную дальность связи. Во второй части статьи рассмотрена взаимосвязь форматов модуляции, дальности связи, спектральной эффективности и символьной скорости оптических каналов ВОСП OTN/DWDM.

Дальность связи по оптическим каналам ВОСП

Переход к форматам модуляции QAM более высокого порядка при сохранении символьной скорости и при одинаковой средней мощности сигнала приводит к увеличению скорости передачи и спектральной эффективности оптического канала (длины волны), но существенно сокращает дальность передачи. При одинаковой средней мощности сигнала при переходе, например от DP-QPSK к DP-16QAM (DP – Dual Polarization), сокращение дальности связано с увеличением плотности расположения точек созвездия на амплитудно-фазовой диаграмме и уменьшением евклидова расстояния между точками созвездия. В результате усложняется различение точек созвездия на фоне шумов. Четырехкратное увеличение количества точек созвездия (при переходе от DP-QPSK до DP-16QAM, или от DP-16QAM до DP-64QAM, или от DP-64QAM до DP-256QAM) уменьшает дальность связи примерно до 25 %.

Скорость передачи данных пропорциональна произведению символьной скорости на символьную эффективность. Символьная эффективность (SmE) – это количество бит, передаваемых каждым символом сигнала: $SmE = \log_2 m$, где m – число различных значений, которые может принимать каждый символ с равной вероятностью. Новые форматы модуляции, в которых вероятности реализации различных значений символа не одинаковы (например, PCS, Probabilistic Constellation Shaping), а также гибридные форматы, будут рассмотрены в отдельной статье.

В случае наиболее широко распространенных форматов mQAM каждый символ определенной поляризации может принимать m значений, где m – это число точек созвездия сигнала mQAM. Каждый символ при использовании формата модуляции mQAM переносит $\log_2 m$ битов. В современных системах оптической связи информация передается одновременно и независимо по двум поляризациям, что позволяет

увеличить скорость передачи в 2 раза. Форматы модуляции, использующие две поляризации для передачи mQAM сигналов, обозначают DP mQAM или PM (Polarization Multiplexing) mQAM (в зарубежной литературе оба обозначения одинаково широко используются и эквивалентны). Удвоение скорости очевидно при рассмотрении каждого символа формата DP-mQAM как результат поляризационного мультиплексирования (PM) двух независимых, ортогонально поляризованных mQAM символов.

Увеличение числа точек созвездия в 4 раза по каждой поляризации увеличивает символьную эффективность SmE на 2 бита:

$$SmE(4m) = \log_2(4m) = \log_2 m + \log_2(4) = SmE(m) + 2.$$

Следовательно, при последовательном переходе к более высоким уровням модуляции с учетверением числа « m » число бит, передаваемых каждым символом, увеличивается на два в каждой поляризации (на 4 в двух поляризациях), но относительный прирост скорости передачи данных уменьшается (рис. 1):

- при переходе от DP-QPSK (DP-4QAM) к DP-16QAM число бит/символ увеличивается с 4 до 8, т.е. скорость передачи данных увеличивается на 100 %;
- при переходе от DP-16QAM к DP-64QAM число бит/символ увеличивается с 8 до 12, т.е. скорость передачи данных увеличивается на 50 %;
- при переходе от DP-64QAM к DP-256QAM число бит/символ увеличивается с 12 до 16, т.е. скорость передачи данных увеличивается только на 33 %.

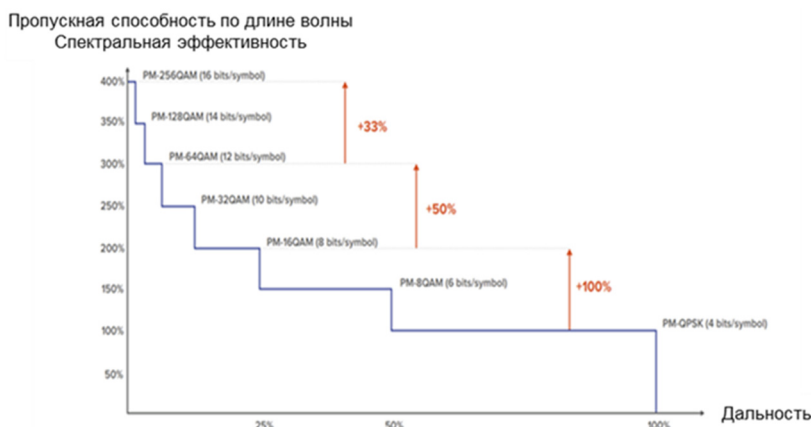


Рис. 1. Снижение дальности связи при увеличении порядка формата модуляции [14]

Необходимо добиваться компромисса между уровнем мощности сигнала в оптическом канале (длине волны) и уровнем мощности шумов, возникающих в результате нелинейных взаимодействий NLIN, такими как четырехволновое смешение FWM (Four-wave Mixing), фазовая самомодуляция SPM (self-phase modulation) и фазовая кросс-модуляция XPM (cross-phase modulation).

Увеличение мощности сигнала позволяет увеличить отношение мощности сигнала к мощности линейного шума ASE, не зависящей от мощности сигнала. Однако рост нелинейных искажений сигнала с ростом мощности сигнала приводит к тому, что уменьшение коэффициента ошибок с ростом мощности сначала замедляется, затем достигает минимума и при дальнейшем увеличении мощности начинает расти.

В современных когерентных ВОЛС без компенсации дисперсии на физическом уровне воздействие нелинейных эффектов на сигнал можно с высокой точностью описать как возникновение нелинейного шума, мощность которого P_{NLI} растет пропорционально кубу мощности сигнала P_S , умноженному на коэффициент нелинейности η :

$$P_{NLI} = \eta P_S^3.$$

При малой мощности сигнала в формуле

$$SNR = \frac{P_S}{P_{ASE} + P_{NLI}} = \frac{P_S}{P_{ASE} + \eta P_S^3}$$

нелинейным шумом можно пренебречь, но по мере увеличения мощности нелинейный шум быстро растет. Существует оптимальная мощность, при которой SNR достигает максимума.

Дальность передачи в ВОЛС ограничена затуханием мощности оптического излучения в волокне, для компенсации которого используются оптические усилители EDFA. Однако периодическое усиление сигнала сопровождается накоплением шума усиленного спонтанного излучения (ASE), ведущим к уменьшению SNR с увеличением протяженности ВОЛС. Увеличение мощности сигнала для обеспечения увеличения SNR ограничено ростом нелинейных искажений с ростом мощности сигнала. По мере увеличения дальности передачи необходимо уменьшать порядок формата модуляции, а следовательно, скорость передачи и спектральную эффективность. Поскольку используются QAM-форматы с конечным числом порядка (4QAM или QPSK, 8QAM,

16QAM, 64QAM, ...), то скорость передачи информации при смене формата модуляции меняется резко. Лучшая гранулярность (детализация) по скорости и дальности передачи данных при сохранении фиксированной сетки частот [14] достигается при использовании гибридного формата модуляции QAM, а именно TDHMF (Time-Domain Hybrid Modulation Format), или форматов с неодинаковыми вероятностями реализации различных значений символов типа PCS. Такие форматы будут рассмотрены в отдельной публикации.

Спектральная эффективность оптических каналов ВОСП

Спектральная эффективность (SE, Spectral Efficiency) оптического канала равна отношению скорости передачи информации C_{BCh} к ширине полосы B_{Ch} канала:

$$SE_{Ch} = C_{BCh} / B_{Ch}.$$

Поскольку символьная скорость пропорциональна ширине (равна в теоретическом пределе) полосе B сигнала, то увеличить спектральную эффективность можно только увеличением символьной эффективности, т.е. числом бит, передаваемых одним символом. Максимальная теоретическая спектральная эффективность группового WDM канала в реальных условиях подчиняется неравенству $SE_{WDM} \leq SE_{Ch}$.

Связано это со следующими причинами:

- форма спектра реального оптического канала не является прямоугольной, а имеет переходную область (область спада) на границах;
- каналы практически невозможно располагать вплотную, нужна небольшая «защитная» полоса – промежуток между оптическими каналами, необходимый для предотвращения перекрестных помех;
- несогласованностью между шириной спектра канала и шагом DWDM сетки частот.

Кроме того, спектральная эффективность каждого канала уменьшается с ростом избыточности алгоритма FEC.

Символьная скорость оптических каналов ВОСП

В когерентных системах связи хроматическая и поляризационная модовая дисперсии практически не ограничивают дальность, поскольку цифровая обработка сигнала на приемной стороне канала позволяет

исключить их деструктивное влияние. Имеются два важных параметра, которыми можно манипулировать:

- символьная скорость передачи, т.е. количество символов, передаваемых в секунду,
- формат модуляции, который определяет количество бит на символ, т.е. символьную эффективность.

Символьная скорость – это общее количество элементов сигнала (символов), передаваемых за одну секунду. Единица измерения «Бод» (символ в секунду) названа по имени Эмиля Бодо, изобретателя кода Бодо.

Битовая скорость – это общее количество битов, передаваемых за одну секунду, или скорость передачи данных при отсутствии ошибок. Единица измерения «бит/с».

Теоретически увеличение символьной скорости позволяет пропорционально увеличить скорость передачи данных на определенной длине волны с минимальным влиянием на дальность связи. При увеличении символьной скорости расширяется спектр сигнала, но сохраняется спектральная эффективность. Повышение символьной скорости передачи сопровождается снижением затрат на передачу каждого бита данных, включая затраты на энергопотребление, а также физических размеров приемопередатчиков (трансиверов), в широком диапазоне изменений дальности связи, эксплуатационных расходов за счет меньшего количества спектральных каналов, которые необходимо предоставлять и которыми надо управлять.

Развитие технологий, применяемых при производстве быстродействующих цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), постепенно снимает физические ограничения на увеличение символьной скорости. Максимальная битовая скорость передачи данных без ошибок (пропускная способность) связана с максимальной символьной скоростью (равной ширине полосы оптического сигнала) следующим выражением (формула Шеннона):

$$C_{DWDM} = B_{DWDM} \log_2 (1 + SNR_{Chanal}) \equiv B_{DWDM} SE_{max}.$$

Необходимость обнаружения и исправления ошибок снижает скорость передачи данных при уменьшении SNR, поскольку растет доля передаваемых битов, используемых для обнаружения и исправления ошибок. Формат модуляции определяет число переданных битов, но не

все они несут полезную нагрузку. Дополнительная (служебная) информация, необходимая для работы FEC, располагается в заголовке цикла OTUk линейного сигнала OTN. Коэффициент избыточности – это отношение битов FEC к битам передаваемых данных. Последние версии высокопроизводительных FEC спроектированы с использованием 15–25 % дополнительных служебных битов в заголовке цикла OTN. При использовании SD FEC размер заголовка сигнала OTUk (количество байтов заголовка) увеличивается до 20 % вместо 7 % для алгоритма предыдущих поколений HD FEC, но при этом достигается кодовое усиление до 9,5–10 дБ (т.е. дополнительное повышение кодового усиления на 1–2 дБ), что соответствует увеличению дальности связи на 20–40 % по сравнению с HD FEC.

Новые технологии изготовления СБИС на кремниевой пластине позволили увеличить символьную скорость с 30 до более чем 60 ГБод всего за три поколения эволюции ЦСП. Параллельно происходило масштабирование от начальной четырехпозиционной (квадратурной) фазовой манипуляции (QPSK), позволяющей передавать 2 бита на символ по каждой поляризации (канал 100G), до 16QAM, способной передавать 4 бита на символ по каждой поляризации (канал 200G). После десятилетия инноваций когерентные модемы сегодня способны реализовать такую модуляцию высокого порядка, как, например, 64QAM с передачей 6 битов на символ по каждой поляризации [2].

Ширина спектра оптического канала прямо пропорциональна символьной скорости передачи. Кроме того, надо также учитывать форму спектра на краю частотного диапазона, т.е. ширину зоны спада спектра, как показано на рис. 2. Например, при символьной скорости 32 ГБод со спадом 10 % ширина спектра канала равна 35,2 ГГц.

Следует отметить, что повышение символьной скорости:

- не может повысить спектральную эффективность отдельного канала. Но с учетом необходимости использования защитных полос спектральная эффективность DWDM-сигнала при увеличении символьной скорости может увеличиться, поскольку станет меньше защитных полос;
- не может обеспечить переход к более высоким скоростям передачи с сохранением фиксированных сеток частот 50 и 100 ГГц для оптических каналов.



Рис. 2. Ширина спектра канала пропорциональна символьной скорости передачи [14]

Разработка оборудования (передатчиков, приемников, цифровых сигнальных процессоров) ориентированного на все более высокие символьные скорости продолжается и для их классификации предложено деление на поколения [15–17]:

- 30–60 ГБод для каналов 100–200 Гбит/с (Gen30, поколение 30),
- 60–90 ГБод для каналов 400–600 Гбит/с (Gen60, поколение 60),
- 90–120 ГБод для каналов 600–800 Гбит/с (Gen90, поколение 90),
- 120–180 ГБод для каналов 800–1200 Гбит/с (Gen120, поколение 120).
- 180 ГБод и более для каналов 1600–3200 Гбит/с (Gen180, поколение 180)

При переходе ко все более высоким символьным скоростям требуется использование ЦСП, выполненных с использованием все более совершенной технологии (табл. 1).

В табл. 2 и на рис. 3 показано, насколько увеличиваются пропускная способность и спектральная эффективность канала и как сокращается дальность связи при переходе к более высоким порядкам формата модуляции с сохранением символьной скорости и, следовательно, ширины спектра оптического канала.

Рассмотрим два сценария увеличения скорости передачи со 100 до 200 Гбит/с:

- в первом сценарии увеличение достигается заменой формата DP QPSK форматом DP 16QAM с сохранением символьной скорости

и удвоением символьной эффективности. В этом случае в DWDM-системе связи удваиваются спектральная эффективность и скорость передачи информации, однако дальность передачи падает в 4 раза (до 25 % от первоначальной);

Таблица 1

Классификация поколений ЦСП по символьной скорости [16]

	Gen30		Gen60		Gen90	Gen120/Gen180	
	2010	2015	2017	2020	2020	2023/24	2023/2024
Максимальная скорость передачи	100-200 Гбит/с		400 – 600 Гбит/с		600-800 Гбит/с	1.2/1.6 Тбит/с	800 Гбит/с
Символьная скорость (Бод)	30-60 ГБод		60-90 ГБод		90-120 ГБод	120-180 ГБод 180 ГБод и выше	
Основные технологии	Фазовая модуляция (QPSK); Много-уровневая модуляция (16 QAM и 8 QAM); Формирование спектра по Найквисту; SD FEC		Интеллектуальные методы модуляции (PCS, Hybrid, до 64 QAM); SD FEC Телеметрия в реальном времени; Совместимые сменны модули-приемопередатчики		Поднесущие с формированием спектра по Найквисту; SD FEC CPO (Co-Packaging)		
Толщина пленок при КМОП технологии	65/40 нм	16 нм	16 нм	5-7 нм	5-7 нм	3-5 нм	
Примеры ЦСП	Infinaera ICE4; NOKIA PSE-2s; NEL ExaSPEED 100; Acacia AC400; Huawei OptiXtreme H3	CFP; Acacia CFP2DCO; CISCO+ CFP2ACO; NOKIA PSE-2c; OptiXtreme G6	Ciena WLAI; NOKIA PSE-3s; Acacia SC1200; NEL ExaSPEED TERA; Huawei OptiXtreme H6	400 ZR/ZR+; OpenZR+; OpenROADM; 400G CFP	Ciena WL5e; Infinaera ICE6; NOKIA PSE-5s; Huawei OptiXtreme H7	Ciena WL6e; Acacia Jannu CIM8; NOKIA PSE-6s; Fujitsu NEL GAIA	

Таблица 2

Снижение дальности связи при переходе к форматам модуляции более высокого порядка с сохранением символьной скорости [18]

	Количество точек на звездной диаграмме	Уменьшение дальности связи	Увеличение бит/ символ по каждой поляризации
QPSK → 16QAM	x 4 (4 → 16)	75% (100% → 25%)	100% (2 → 4)
16QAM → 64QAM	x 4 (16 → 64)	75% (25% → 6.25%)	50% (4 → 6)
64QAM → 256QAM	x 4 (64 → 256)	75% (6.25% → 1.5625%)	33% (6 → 8)

– во втором сценарии увеличение скорости передачи информации достигается при удвоении символьной скорости и сохранении формата модуляции (DP QPSK). В этом случае скорость передачи информации в DWDM-системе связи, спектральная эффективность и дальность передачи не изменяются.

При удвоении символьной скорости до 64 ГБод с переходом к формату модуляции QPSK для каналов 200G мощность шума ASE удваивается из-за увеличения вдвое полосы частот канала с 35 до 70 ГГц (в связи с удвоением символьной скорости), однако дальность действия можно сохранить, удвоив мощность сигнала (+3 дБ) при сохранении той же

спектральной плотности мощности и, следовательно, при сохранении того же уровня нелинейностей, как и для канала 100G с форматом модуляции DP-QPSK.

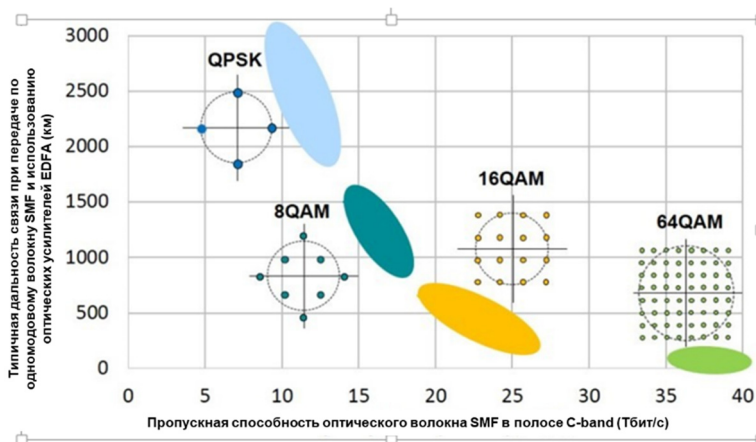


Рис. 3. Снижение дальности связи при переходе к форматам модуляции более высокого порядка с сохранением символьной скорости [19]

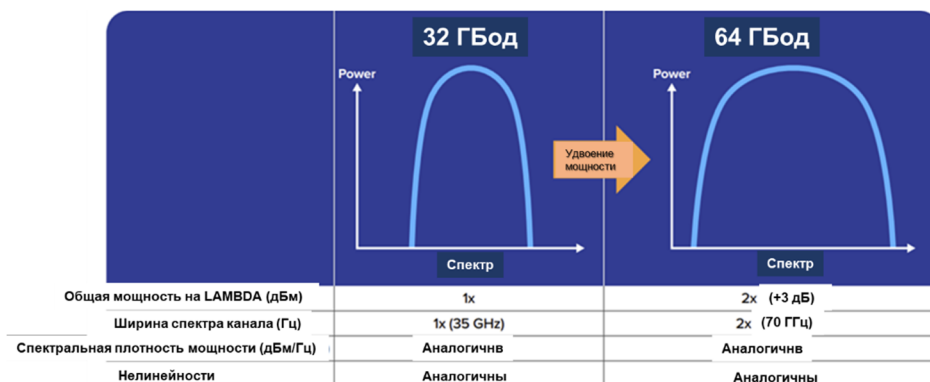


Рис. 4. Спектр сигнала при удвоении символьной скорости с 32 до 64 ГБод [20]

Реализация высокоскоростных оптических каналов в перспективных ВОСП

Протяженность каналов 200 Гбит/с использованием формата модуляции QPSK и символьной скорости 64 ГБод, примерно, в 4 раза превышает протяженность каналов 200G с использованием формата модуляции 16QAM и символьной скорости 32 ГБод. При этом ширина полосы частот канала расширится с 50 до 75 ГГц, а дальность связи увеличится до нескольких тысяч километров.

На городских (METRO) сетях для каналов 400 Гбит/с можно использовать формат модуляции 16 QAM (4 бита на символ на каждую поляризацию) и символьную скорость 60–70 ГБод. При этом ширина полосы частот канала составит порядка 75 ГГц, а дальность связи на однопролетных участках (сети взаимодействия ЦОД) составит 80–120 км.

На протяженных магистральных сетях с многочисленными оптическими участками OTS (multi-haul) для каналов 400G можно использовать формат модуляции QPSK с 2 битами на символ на каждую поляризацию и символьной скоростью 120–140 ГБод, при этом ширина полосы частот канала составит порядка 150 ГГц, а дальность связи достигнет нескольких тысяч километров.

На городских (METRO) сетях для каналов 800 Гбит/с можно использовать формат модуляции DP-16QAM с 4 битами на символ на каждую поляризацию и символьной скоростью порядка 130–140 ГБод, при этом ширина полосы частот канала составит порядка 150 ГГц, а дальность связи на однопролетных участках (сети взаимодействия ЦОД) составит порядка 80–100 км.

Рекордные результаты по дальности передачи 6600 км для оптического канала 800 Гбит/с при символьной скорости порядка 130 ГБод показаны компанией NOKIA с использованием ЦСП NOKIA PSE-6s на подводной (submarine) сети компании Orange [17]. Дальность связи для канала 800 Гбит/с на наземных сетях – более 2000 км [20].

Кремниевые-фотонные (SiP) модули CSTAR (DSP-agnostic Silicon Photonics COSA transmitter and receiver) компании NOKIA представляют собой оптический интерфейс когерентной оптической сборки COSA (Coherent Optical Subassembly) для использования как в сменных, так и встраиваемых модулях-приемопередатчиков цифровой когерентной оптики (DCO). Оптика Silicon Photonics CSTAR используется либо в виде автономных модулей COSA, либо в составе интегрированных многочиповых модулей. Они обеспечивают оптический интерфейс для когерентных трансиверов.

Модули CSTAR используются в сменных DCO как компании NOKIA, так и сторонних производителей для каналов 100, 400 и 800 Гбит/с в конструктивном исполнении QSFP-DD и CFP2. Кроме того, модуль цифровой когерентной оптики (DCO) компании NOKIA, в который интегрированы новейший когерентный ЦСП PSE-6s и PIC CSTAR, при символьной скорости порядка 130–140 ГБод поддерживает скорость передачи данных порядка 1,2 Тбит/с.

В DCO компании NOKIA используется ЦСП PSE6s с вероятностным формированием созвездий (PCS) третьего поколения, с кодом обнаружения и исправления ошибок FEC, с плавно регулируемой скоростью передачи данных и встроенным оптическим усилителем.

Компания Asacia поделилась результатами трех испытаний ЦСП CIM 8 [21] с символьной скоростью 140 ГБод на реальных сетях, которые проводились, совместно с компаниями:

- Adtran и NYSERNet (канал 800G, дальность 2220 км);
- China Mobile и ZTE (канал 400G, дальность 5616 км);
- Windstream Wholesale (канал 1T, дальность 540 км).

Компания Adtran (ADVA) успешно завершила полевые испытания оптического канала 800 Гбит/с на одной несущей протяженностью 2220 км на наземной сети (с использованием ЦСП Asacia CIM-8 с символьной скоростью 140 ГБод). Испытания проводились на сети некоммерческой организации NYSERNet, которая была основана сообществом высшего образования Нью-Йорка для продвижения науки и образования. В ходе этого полевого испытания тестовый маршрут проходил через 14 узлов ROADM по участкам (OTS, Optical Transport Section), построенным на оптических волокнах как G.652, так и G.655 [22].

Рекордные результаты по дальности передачи для оптического канала 1,2 Тбит/с при символьной скорости порядка 140–150 ГБод и ширине полосы частот канала 150 ГГц достигнуты компаниями Fujitsu [23] 336 км и NOKIA [24] 118 км.

Первой решения с символьной скоростью 200ГБод практически реализовала компания Ciena. Было показано, что использование 3-нм КМОП процесса для изготовления ЦСП Ciena WaveLogic 6 Extreme (WL6e) [25] обеспечивает значительные преимущества в характеристиках и энергопотреблении по сравнению с 5-нм КМОП процессом, и позволяет обеспечить развертывание 1,6-терабитных решений в 2024 г. Компания сообщила также о положительном результате испытаний когерентного передатчика CDM (Coherent Driver Modulator) и когерентного приемника ICR (Integrated Coherent Receiver), поддерживающих символьную скорость 200 ГБод.

ЦСП Ciena WaveLogic™ 6 Nano нацелено на реализацию линейных интерфейсов 400–800G, а также на внедрение этого ЦСП в сменные оптические когерентные линейные модули-приемопередатчики для систем DWDM в соответствии с Соглашением о внедрении интерфейса

OIF 800ZR [26]. Для канала с интерфейсом 800ZR с полосой частот порядка 150 ГГц на сети в конфигурации «точка – точка» ЦСП WL6n обеспечивает дальность связи не менее 120 км. Дополнительные улучшения позволяют увеличить дальность связи на городских сетях до 500 км, что соответствует рекомендациям ITU-T/Open ROADM MSA.

Оператор сети Southern Cross готовится стать первым оператором подводного кабельного телевидения, предполагающим при расширении сети Southern Cross (SX) NEXT от Сиднея до Лос-Анджелеса организовать оптический канал 800 Гбит/с через Тихий океан. С использованием WL6s планируется реализовать оптический канал 800 Гбит/с на подводной сети протяженностью более 12 500 км, обеспечивая надежные, энергоэффективные соединения с высокой пропускной способностью для поддержки, например, услуг 400GbE от Southern Cross [27].

На протяженных магистральных сетях с многочисленными оптическими участками OTS (multi-haul) для каналов 800G можно использовать формат модуляции DP-QPSK с 2 битами на символ на каждую поляризацию и символьной скоростью порядка 260 ГБод, при этом ширина полосы частот канала составит порядка 300 ГГц. Пока нет сведений о полевых испытаниях подобных систем.

Рекордный результат по дальности связи более 100 км для оптического канала более 2Тбит/с с символьной скорости порядка 260 ГБод был представлен на ECOC 2022 компанией NOKIA Bell Labs в сотрудничестве с компанией Keysight. В эксперименте использован I/Q-модулятор на основе ниобата лития LiNbO₃ (thin film lithium niobate I/Q modulator) с полосой частот 110 ГГц по уровню 3 дБ [28].

Компания EFFECT Photonics, ведущий разработчик высоко интегрированных оптических решений, в октябре 2023 г. 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), т.е. полностью реализованного в виде монолитной интегрированной InP PIC. Это решение было представлено на стенде компании EFFECT Photonics на выставке ECOC 2023 [29].

На OFC-2024 [30] было доложено о создании нового I/Q-модулятора на основе фосфида индия InP (NTT Innovative Devices Corporation in Japan) для высокоскоростных оптических когерентных каналов и достижении скорости передачи порядка 1,8 Тбит/с с дальностью порядка

80 км по стандартному одномодовому волокну в полосе C+L при физических размерах модулятора $11,9 \times 29,8 \times 4,35 \text{ mm}^3$.

Выводы

На протяженных магистральных сетях для оптических каналов с форматом модуляции DP-QPSK потребуется (с учетом необходимости передачи порядка 20 % служебных данных для SD FEC) символьная скорость более [31]:

- 125 ГБод для оптических каналов с пропускной способностью 400 Гбит/с;
- 250 ГБод для оптических каналов с пропускной способностью 800 Гбит/с.

Основной тенденцией в развитии оптических когерентных ВОСП OTN/DWDM является повышение их канальной скорости при сохранении дальности за счет увеличения символьной скорости при сохранении числа значений «*m*», принимаемых символами формата модуляции DP-*m*QAM. Платой за такое развитие является расширение спектра частот, занимаемого оптическим каналом. Кроме того, придется переходить от фиксированной сетки FixedGrid, например 100 и 50 ГГц, к гибкой сетке частот FlexGrid.

Спектральную эффективность можно увеличить только увеличением символьной эффективности, т.е. числом бит, передаваемых одним символом. При сохранении числа значений «*m*», принимаемых символами формата модуляции DP-*m*QAM, символьная эффективность не изменяется. Повышение символьной скорости не может повысить спектральную эффективность отдельного канала. Но при увеличении символьной скорости отдельных каналов спектральная эффективность DWDM группового сигнала может увеличиться, поскольку количество оптических каналов уменьшится и станет меньше защитных полос между ними. Следует также учесть, что спектральная эффективность оптического канала снижается с ростом избыточности алгоритма FEC.

При использовании форматов модуляции с неравными вероятностями реализации значений символов PCS (Probabilistic Constellation Shaping), а также при использовании гибридных форматов появляется возможность, с одной стороны, плавно, без изменения символьной скорости, изменять символьную (и спектральную) эффективность и даль-

ность связи, а с другой стороны, выбрать оптимальную символьную скорость, а затем использовать алгоритм PCS для получения желаемой скорости передачи данных по оптическому каналу (длине волны) [32]. Более высокая символьная скорость передачи в алгоритме PCS позволяет достичь максимума пропускной способности и дальности связи для оптического канала (длины волны) при снижении затрат и энергопотребления в пересчете на бит. Форматы модуляции, использующие PCS, и гибридные форматы будут рассмотрены в отдельной публикации.

Список литературы

1. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия / В.А. Конышев, А.В. Леонов, О.Е. Наний, В.Н. Трешиков, Р.Р. Убайдуллаев // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 16. – С. 15–27.
2. Meeting the demand for optical bandwidth over the next decade. – NOKIA 2023. – URL: <https://www.nokia.com/blog/meeting-the-demand-for-optical-bandwidth-over-the-next-decade/>
3. What the FEC? – URL: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec/>
4. Nearing the Shannon Limit: Terabit Coherent Optical Networks / Sterling Perrin // A Heavy Reading WP (Nokia). – 2022. – URL: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2082
5. Statistical Assessment of Open Optical Networks / Emanuele Virgillito, Alessio Ferrari, Andrea D'Amico, Vittorio Curri. – URL: https://www.researchgate.net/publication/344745779_Statistical_Assessment_of_Open_Optical_Networks
6. Amplified Spontaneous Emission (ASE) Article. – URL: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission/>
7. Кусайкин, Д. Волокна будущих петабитных сетей / Д. Кусайкин. – URL: <https://nag.ru/material/30950>
8. Кусайкин, Д. Одно/мало/многомодовые волокна, в чем соль? / Д. Кусайкин. – URL: <https://nag.ru/material/31187#:~:text=Маломодовые%20волокна%2C%20по%20сути%2C%20представляют,распространение%20небольшого%20количества%20пространственных%20мод.>
9. Наний, О.Е. Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с / О.Е. Наний, В.Н. Трешиков // Вестник связи – 2012. – № 1. – С. 35–38.
10. Наний, О.Е. Когерентные системы связи / О.Е. Наний // LIGHTWAVE Russian Edition – 2008. – № 4. – С. 23–27.
11. Леонов, А.В. Тенденции развития когерентных систем связи в 2010–2025 гг. / А.В. Леонов, В.Н. Трешиков, Р.Р. Убайдуллаев // Фотон-экспресс. – 2019. – № 8 (160). – С. 4–7.

12. Коган, С.С. Эволюция решений с обнаружением и исправлением ошибок в оптических каналах OTN/DWDM. Ч. 1: Мониторинг оптических каналов и критерии эффективности кодов с коррекцией ошибок / С.С. Коган // Первая миля/Last mile». – 2023. – № 7. – С. 56–61.

13. Коган, С.С. Эволюция решений с обнаружением и исправлением ошибок в оптических каналах OTN/DWDM. Ч. 2: Эволюция поколений и совместимые алгоритмы FEC / С.С. Коган // Первая миля/Last mile. – 2023. – № 8. – С. 52–58.

14. Infinera. Baud Rate, Modulation, and Maximizing Coherent Optical Performance. White Paper. – URL: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Baud-Rate-Modulation-and-Maximizing-Coherent-Optical-Performance-0294-WP-RevA-0921.pdf>

15. Signal AI. OFC 2024 Preview. – URL: <https://signal.ai/2024/03/ofc-2024-preview/>

16. Signal AI. 400ZR vs 800G – Classifying Coherent Technology. – 2021. – URL: <https://signal.ai/2021/10/400zr-vs-800g-classifying-coherent-technology/>

17. GEN120+ Coherent Trials and Deployments. – URL: <https://signal.ai/2023/11/gen120-coherent-trials-and-deployments>

18. Infinera. Faster, further, smoother: the case for probabilistic constellation shaping. White Paper. – 2020. – URL: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Probabilistic-Constellation-Shaping-0257-WP-RevB-0620.pdf>

19. Кобышев, В. Развитие волоконно-оптических информационных сетей DWDM DCI / В. Кобышев, О. Наний, В.Н. Трещиков // Первая миля / Last mile. – 2019. – № 4. – С. 46–50.

20. Nokia PSE-6s super-coherent optics. – URL: https://onestore.nokia.com/asset/213067?_ga=2.247108996.1097776829.1712562568-730815896.1614834341

21. Acacia Completes CIM 8 Trials with Adtran, Windstream & China Mobile. – URL: <https://www.thefastmode.com/technology-solutions/30996-acacia-completes-cim-8-trials-with-adtran-windstream-china-mobile>

22. Adtran breaks industry record for single-carrier 800G long-haul transport. Press-release. – URL: <https://investors.adtran.com/news-and-events/press-release-details/2023/Adtran-breaks-industry-record-for-single-carrier-800G-long-haul-transport/default.aspx>

23. Fujitsu offers 1.2-Tbps 1FINITY Ultra Optical System. – URL: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/dwdm-roadm/article/14290314/fujitsu-offers-12-tbps-1finity-ultra-optical-system>

24. Nokia and GlobalConnect demonstrate record 1.2Tb/s coherent transmission over a single wavelength in live network. – URL: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2023/02/23/nokia-and-globalconnect-demonstrate-record-12tbs-coherent-transmission-over-a-single-wavelength-in-live-network/>

25. Ciena Unveils WaveLogic 6, Industry's First 1.6Tb/s Coherent Optic Solution. – URL: <https://newswire.telecomramblings.com/2023/02/ciena-unveils-wavelogic-6-industrys-first-1-6tb-s-coherent-optic-solution-2/>

26. WaveLogic™ 6 Nano: Achieving Leading Performance at the Lowest Power Consumption with 400G–800G Pluggables. – URL: <https://www.ciena.com/insights/infobriefs/wavelogic-6-nano-achieving-leading-performance-at-the-lowest-power-consumption-with-400g-800g-pluggables>

27. Southern Cross Targets Pacific Record with Ciena's WaveLogic 6. – URL: <https://www.ciena.com/about/newsroom/press-releases/southern-cross-targets-pacific-record-with-cienas-wavelogic-6>

28. Keysight and NOKIA Bell Labs Achieve Record Symbol Rate of 260 GBaud Transmission in Coherent Communications. – URL: <https://www.bar-chart.com/story/news/10345135/keysight-and-nokia-bell-labs-achieve-record-symbol-rate-of-260-gbaud-transmission-in-coherent-optical-communications>

29. 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/>

30. OFC-2024, 24 – 28 March 2024 at the San Diego Convention Center. New data speed record on optical fiber. – URL: <https://www.ofcconference.org/en-us/home/news-and-press/press-releases/2024/new-data-speed-record-on-optical-fiber/>

31. Optical networks move to metro 800G and long haul 400G. – URL: <https://www.5gtechnologyworld.com/optical-networks-move-to-metro-800g-and-long-haul-400g/>

32. Manabu, Arikawa. Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization / Manabu Arikawa, Masaki Sato, Kazunori Hayashi // Optics Express. – 2020. – Vol. 28, iss. 2. – P. 1300–1315. – URL: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-28-2-1300&id=425782>

References

1. Konyshov V.A., Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Opticheskaja revoliutsiia v sistemakh svyazi i ee sotsial'no-ekonomicheskie posledstviia [Optical revolution in communications systems and its social and economic impact]. *Applied Photonics*, 2016, vol. 3, no. 1, pp. 15-27.

2. Meeting the demand for optical bandwidth over the next decade, available at: <https://www.nokia.com/blog/meeting-the-demand-for-optical-bandwidth-over-the-next-decade> (accessed 27 May 2024).

3. What the FEC, available at: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec> (accessed 29 May 2024).

4. Nearing the Shannon Limit: terabit coherent optical networks, available at: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2082 (accessed 29 May 2024).

5. Virgillito E., Ferrari A., D'Amico A., Curri V. Statistical assessment of open optical networks, available at: https://www.researchgate.net/publication/344745779_Statistical_Assessment_of_Open_Optical_Networks (accessed 30 May 2024).

6. Amplified spontaneous emission, available at: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission> (accessed 30 May 2024).

7. Kusaikin D. Volokna budushchikh petabitnykh setei, available at: <https://nag.ru/material/30950> (accessed 10 June 2024).

8. Kusaikin D. Odno/malo/mnogo-modovye volokna, v chem sol', available at: <https://nag.ru/material/31187> (accessed 10 June 2024).

9. Nanii O.E., Treshchikov V.N. Analiz formatov moduliatsii dlia sistem DWDM so skorost'iu 40 Gbit/s [Analysis of modulation formats for 40 Gbit/s DWDM systems]. *Vestnik svyazi*, 2012, no. 1, pp. 35-38.

10. Nanii O.E. Kogerentnye sistemy svyazi [Coherent communication systems]. *Lightwave Russian Edition*, 2008, no. 4, pp. 23-27.

11. Leonov A.V., Treshchikov V.N., Ubaidullaev R.R. Tendentsii razvitiia kogerentnykh sistem svyazi v 2010–2025 gg. [Trends in the development of coherent communication systems in 2010-2025]. *Foton-Express*, 2019, vol. 160, no. 8, pp. 4-7.

12. Kogan S.S. Evoliutsiia reshenii s obnaruzheniem i ispravleniem oshibok v opticheskikh kanalakh OTN/DWDM. Chast' 1. Monitoring opticheskikh kanalov i kriterii effektivnosti kodov s korrektsiei oshibok [Evolution of solutions with error detection and correction in OTN/DWDM optical channels. Part 1. Optical channel monitoring and performance criteria for error correcting codes]. *Last Mile*, 2023, no. 7, pp. 56-61.

13. Kogan S.S. Evoliutsiia reshenii s obnaruzheniem i ispravleniem oshibok v opticheskikh kanalakh OTN/DWDM. Chast' 2. Evoliutsiia pokolenii i sovmestimye algoritmy FEC [Evolution of solutions with error detection and correction in OTN/DWDM optical channels. Part 2. Generational evolution and FEC compatible algorithms]. *Last Mile*, 2023, no. 8, pp. 52-58.

14. Baud rate, modulation, and maximizing coherent optical performance, available at: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Baud-Rate-Modulation-and-Maximizing-Coherent-Optical-Performance-0294-WP-RevA-0921.pdf> (accessed 14 June 2024).

15. OFC 2024 preview, available at: <https://cignal.ai/2024/03/ofc-2024-preview> (accessed 14 June 2024).

16. 400ZR vs 800G – Classifying coherent technology, available at: <https://cignal.ai/2021/10/400zr-vs-800g-classifying-coherent-technology> (accessed 14 June 2024).

17. GEN120+ coherent trials and deployments, available at: <https://cignal.ai/2023/11/gen120-coherent-trials-and-deployments> (accessed 14 June 2024).

18. Faster, further, smoother: the case for probabilistic constellation shaping, available at: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Probabilistic-Constellation-Shaping-0257-WP-RevB-0620.pdf> (accessed 14 June 2024).

19. Konyshev V., Nanii O., Treshchikov V.N. Razvitie volokonno-opticheskikh informatsionnykh setei DWDM DCI [Development of fiber optic DWDM DCI information networks]. *Last Mile*, 2019, no. 4, pp. 46-50.

20. Nokia PSE-6s super-coherent optics, available at: <https://onestore.nokia.com/asset/213067?ga=2.247108996.1097776829.1712562568-730815896.1614834341> (accessed 15 June 2024).

21. Acacia completes CIM 8 trials with Adtran, Windstream & China Mobile, available at: <https://www.thefastmode.com/technology-solutions/30996-acacia-completes-cim-8-trials-with-adtran-windstream-china-mobile> (accessed 15 June 2024).

22. Adtran breaks industry record for single-carrier 800G long-haul transport, available at: <https://investors.adtran.com/news-and-events/press-release-details/2023/Adtran-breaks-industry-record-for-single-carrier-800G-long-haul-transport/default.aspx> (accessed 15 June 2024).

23. Fujitsu offers 1.2-Tbps 1FINITY Ultra Optical System, available at: <https://www.lightwaveonline.com/network-design/dwdm-roadm/article/14290314/fujitsu-offers-12-tbps-1finity-ultra-optical-system> (accessed 15 June 2024).

24. Nokia and GlobalConnect demonstrate record 1.2Tb/s coherent transmission over a single wavelength in live network, available at: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2023/02/23/nokia-and-globalconnect-demonstrate-record-12-tbs-coherent-transmission-over-a-single-wavelength-in-live-network> (accessed 15 June 2024).

25. Ciena unveils WaveLogic 6, industry's first 1.6Tb/s coherent optic solution, available at: <https://newswire.telecomramblings.com/2023/02/ciena-unveils-wavelogic-6-industrys-first-1-6tb-s-coherent-optic-solution-2> (accessed 18 June 2024).

26. WaveLogic™ 6 Nano: achieving leading performance at the lowest power consumption with 400G–800G pluggables, available at: <https://www.ciena.com/insights/infobriefs/wavelogic-6-nano-achieving-leading-performance-at-the-lowest-power-consumption-with-400g-800g-pluggables> (accessed 18 June 2024).

27. Southern Cross targets pacific record with Ciena's WaveLogic 6, available at: <https://www.ciena.com/about/newsroom/press-releases/southern-cross-targets-pacific-record-with-cienas-wavelogic-6> (accessed 18 June 2024).

28. Keysight and Nokia Bell Labs achieve record symbol rate of 260 GBaud transmission in coherent communications, available at: <https://www.bar-chart.com/story/news/10345135/keysight-and-nokia-bell-labs-achieve-record-symbol-rate-of-260-gbaud-transmission-in-coherent-optical-communications> (accessed 18 June 2024).

29. EFFECT Photonics verifies fully integrated InP PIC for world's smallest digital ITLA for coherent applications, available at: <https://effectphotonics.com/press-releases/worlds-smallest-digital-itla-for-coherent-applications> (accessed 18 June 2024).

30. New data speed record on optical fiber, available at: <https://www.ofconferrence.org/en-us/home/news-and-press/press-releases/2024/new-data-speed-record-on-optical-fiber> (accessed 18 June 2024).

31. Optical networks move to metro 800G and long haul 400G, available at: <https://www.5gtechnologyworld.com/optical-networks-move-to-metro-800g-and-long-haul-400g> (accessed 18 June 2024).

32. Arikawa M., Sato M., Hayashi K. Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 1300-1315.

Сведения об авторах

КОГАН С.С.

e-mail: kogan@t8.ru

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, советник генерального директора, Компания ООО «Т8» по формированию технической стратегии, г. Москва, Санкт-Петербург

НАНИЙ О.Е.

e-mail: naniy@t8.ru

Доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, заместитель генерального директора, Компания ООО «Т8» по научной работе, г. Москва

ТРЕЩИКОВ В.Н.

e-mail: vt@t8.ru

Доктор технических наук, генеральный директор Компании ООО «Т8», г. Москва

About the authors

S.S. KOGAN

e-mail: kogan@t8.ru

Ph. D in telcommunication, Advisor to the General Director on the formation of a technical strategy of T8 LLC, Moscow & Saint Petersburg

O.E. NANIY

e-mail: naniy@t8.ru

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Faculty of Physics, Moscow Lomonosov University, Deputy General Director for scientific work of T8 LLC, Moscow

V.N. TRESHCHIKOV

e-mail: vt@t8.ru

Doctor of Technical Sciences, General Director of T8 LLC, Moscow

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценный.

Получена: 02.04.2024

Одобрена: 05.04.2024

Принята к публикации: 08.04.2024

Financing. The work was not sponsored.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 02/04/2024

Approved: 05/04/2024

Accepted for publication: 08/04/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Коган, С.С. Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM. Ч. 2. Дальность связи, спектральная эффективность и символьная скорость / С.С. Коган, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков в // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 2. – С. 5–25.

Please cite this article in English as: Kogan S.S., Nanii O.E., Treshchikov V.N. High-speed optical channels of advanced optical transport networks OTN/DWDM. Part 2: Communication range, spectral efficiency and symbol rate. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 5–25.