

УДК 621.372.8.082.5

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

¹Производственная компания ООО Т8, Москва, Российская Федерация

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

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

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМАТОВ МОДУЛЯЦИИ

В цикле статей представлены аналитические материалы по пропускной способности и эволюции форматов модуляции оптических каналов ВОСП OTN/DWDM; по дальности связи, спектральной эффективности и символической скорости оптических каналов ВОСП OTN/DWDM;

Ключевые слова: когерентные волоконно-оптические системы передачи, пропускная способность, формат модуляции, символическая скорость.

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

BANDWIDTH AND THE EVOLUTION OF MODULATION FORMATS

The series of articles presents analytical materials on the throughput and evolution of modulation formats for OTN/DWDM FOTS optical channels; in terms of communication range, spectral efficiency and symbol rate of OTN/DWDM FOTS optical channels;

Keywords: coherent fiber-optic transmission systems, throughput, modulation format, symbol rate.

Введение

Двумя важными направлениями развития волоконно-оптической связи являются: увеличение пропускной способности и увеличение дальности передачи по каналам оптических транспортных систем OTN/DWDM. За последние два десятилетия пропускная способность волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) увеличилась более чем стократно. Это соответствует среднегодовому темпу роста в 40 %. Такая тенденция аналогична закону Мура для кремниевых интегральных схем. Из этой тенденции следует, что через 25 лет пропускная способность оптических транспортных сетей увеличится до более чем 40 петабит в секунду на волокно [1, 2].

Этот рост стимулируется:

- постоянно растущим количеством оптического волокна на периферии сети;
- более высокими скоростями услуг сетей мобильной связи пятого поколения (5G), потребительских и бизнес-соединений;
- продолжающимся ростом количества новых, в том числе видеоприложений, таких как VR (виртуальная реальность) / AR (дополненная реальность), сопровождение автономных транспортных средства, тактильный Интернет и т.п.;
- услугами, связанными с переходом к Индустрии 4.0, т.е. к технологическим и экономическим изменениям, связанным с такими инновациями, как искусственный интеллект, блокчейн, Интернет вещей, криптовалюта, средства автоматизация и т.п.;
- услугами, связанными с перспективой перехода к Индустрии 5.0, т.е. к следующему поколению роботов (их принято называть коботами), которые будут понимать и чувствовать цели и ожидания человека-оператора. Коллаборативный робот (кобот) – это автоматическое устройство, которое может работать совместно с человеком для создания или производства различных продуктов. После обучения коботы будут выполнять желаемые задачи так же, как и люди-операторы.

Новые услуги и приложения требуют все большей пропускной способности сетей связи, что стимулирует развитие волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с увеличением их пропускной способности и гибкости. Переход к более высокой пропускной способности оптических каналов (длин волн) ВОСП с выполнением требований по

дальности передачи позволит операторам снизить эксплуатационные расходы, поскольку для достижения требуемой пропускной способности сетевые операторы могут организовывать и управлять меньшим количеством оптических каналов (длин волн) с меньшим количеством промежуточных узлов регенерации, т.е. узлов с функцией ОЕО (Optical-Electrical-Optical) преобразования.

1. Пропускная способность ВОСП

Современное многоканальное транспортное оборудование когерентных ВОСП обеспечивает пропускную способность каналов от 100 Гбит/с до 1,2/1,6 Тбит/с. Доступные в настоящее время когерентные цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) позволяют сетевым операторам оптимизировать пропускную способность и дальность связи, а программно-управляемый формат модуляции и скорости передачи данных, обеспечиваемые этими ЦСП, поддерживают разнообразные приложения, благодаря чему одно и то же оборудование может использоваться на разных уровнях сети, т.е.:

- на периферии сети,
- городских и региональных сетях,
- магистральных сетях большой и сверхбольшой протяженности,
- подводных сетях.

Таким образом, обеспечивается экономичный способ использования одного и того же оборудования для нескольких приложений. Например, один и тот же ЦСП может обеспечить пропускную способность одного канала до 1,2/1,6 Тбит/с с высоким порядком модуляции и не очень большой дальностью связи для сетей взаимодействия ЦОД-ов, или создание оптических каналов с более низким порядком модуляции с более низкой пропускной способностью для подводных линий связи с передачей данных на сверхдальние расстояния.

Хотя оптические волокна известны своей большой пропускной способностью, все же они тоже имеют физические ограничения. Для приближения к теоретическому пределу пропускной способности и сокращения разрыва между практически достигнутыми результатами и теоретическим пределом, обнаруженным Клодом Шенноном, необходимо преодолеть такие факторы, как неидеальная реализация упреждающей коррекции ошибок (FEC), нелинейные взаимодействия при многоканальной передаче в оптическом волокне, неполная реализация параметра ENOB (Effective Number Of Bits) для АЦП/ЦАП, т.е.

эффективного числа битов на отсчет сигнала, получаемого при практической реализации АЦП / ЦАП, являющихся неотъемлемой частью ЦСП, и т.п.

Применение упреждающей коррекции ошибок с мягким принятием решений (SD FEC) приводит к появлению дополнительного запаса 3 дБ по OSNR (Optical Signal Noise Ratio), т.е. к возможности дополнительного увеличения дальности связи без промежуточного ОЕО (Optical-Electrical-Optical) преобразования [3].

Теорема Шеннона

Под пропускной способностью канала понимается максимум взаимной информации на входе и выходе канала. Пропускную способность канала увеличивать бесконечно невозможно, даже теоретически. Независимо от используемого формата модуляции любая передача имеет предел, за которым информационная емкость не может увеличиться. В статье Клода Шеннона, опубликованной в 1948 г., определена теоретическая максимальная скорость передачи данных по каналу связи при наличии шума. Там показано, что максимальная пропускная способность канала передачи информации связана с существованием кода, который можно использовать для передачи информации по каналу с ошибкой, стремящейся к нулю (при увеличении длины блока этого кода). Под пределом Шеннона (Shannon limit) понимается максимальная скорость передачи, для которой имеется возможность выбрать сигнално-кодировую конструкцию, чтобы исправить ошибки в канале с заданными полосой и отношением сигнал/шум (рис. 1):

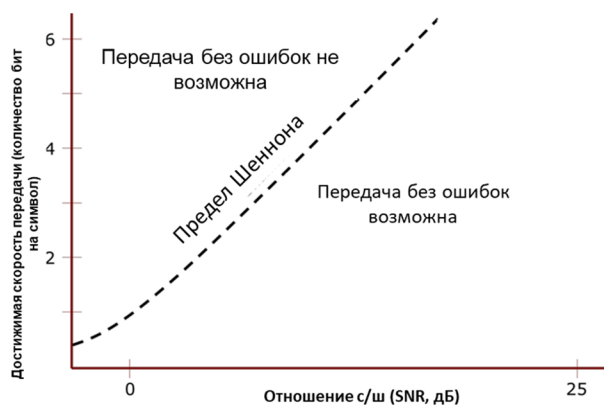


Рис. 1. Зависимость максимальной символьной эффективности (количество бит на символ при передаче данных по каналу без ошибок) от значений отношения сигнал / шум (предел Шеннона [4])

- если скорость передачи сообщений меньше пропускной способности канала связи, то существуют коды и методы декодирования такие, что средняя и максимальная вероятности ошибки декодирования стремятся к нулю, когда длина блока стремится к бесконечности;
- если скорость передачи сообщений больше пропускной способности канала связи, то кода, на основе которого можно добиться сколько угодно малой вероятности возникновения ошибки, не существует.

В соответствии с теоремой Шеннона для канала с помехами всегда можно найти такую систему кодирования, при которой сообщения будут переданы со сколь угодно большой степенью верности, если только производительность источника не превышает пропускной способности канала.

Теорема и уравнение Шеннона–Хартли

В соответствии с теоремой Шеннона–Хартли пропускная способность канала, означающая теоретическую верхнюю границу скорости передачи данных, которые можно передать с данной средней мощностью сигнала через канал связи с аддитивным белым гауссовским шумом AWGN (Additive White Gaussian Noise), определяется как

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right),$$

где C – пропускная способность канала, бит/с; B – полоса пропускания канала, Гц; S – полная мощность сигнала с определенной полосой частот, Вт; N – полная мощность шума в полосе частот сигнала, Вт; S/N (SNR) – отношение мощности сигнала к мощности шума.

В современных когерентных линиях связи параметр SNR определяется соотношением [5]:

$$\text{SNR} = \frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}},$$

где P_{ch} – уровень мощности полезного оптического сигнала с определенной полосой частот; P_{ASE} – уровень мощности шума усиленной спонтанной эмиссии ASE (Amplified Spontaneous Emission), генерируемого оптическими усилителями, установленными по маршруту передачи сигнала в полосе частот сигнала. Уровень шума ASE учитывается при планировании сети как аддитивный белый гауссовский шум AWGN. Аддитивный белый гауссовский шум AWGN – это вид шума, наиболее часто

используемый для расчёта и моделирования систем радиосвязи. Термин «аддитивный» означает, что данный вид шума статистически не зависит от сигнала и что шумы, возникающие в разных частях ВОЛС, суммируются линейно. В противоположность аддитивному можно указать мультипликативный шум, т.е. шум, статистически зависимый от сигнала [6].

P_{NLI} – общая эквивалентная мощность шумов из-за нелинейных взаимодействий NLI (Non-Linear-Interference), т.е. уровень шумов нелинейности NLIN (Non-Linear-Interference Noise) в полосе частот полезного сигнала.

На характеристики передачи в многоканальных ВОСП влияет не только линейный аддитивный белый гауссовский шум AWGN типа ASE, но и нелинейные искажения [7], которые принято приближенно трактовать как шум. Понимание особенностей и статистических характеристик нелинейного шума NLIN (NonLinear Interference Noise) имеет решающее значение для эффективного проектирования и точного прогнозирования характеристик ВОСП [9]. Параметр NLIN связан также с оптическими участками и их количеством по маршруту передачи сигнала.

Параметр SNR – это отношение мощности сигнала к мощности шума в полосе сигнала. Для получения истинного значения этого параметра необходимо уровень мощности шума, как и уровень полезного сигнала, измерять в полосе частот полезного сигнала. При переходе на более высокую символьную скорость полоса частот полезного оптического сигнала увеличивается, а спектральная плотность мощности этого сигнала (при фиксированной мощности) снижается, что приводит к уменьшению дальности передачи. Однако если при увеличении символьной скорости пропорционально увеличить мощность сигнала (так, чтобы SNR не изменился), то дальность связи не изменится. Таким образом, при заданном формате модуляции величина SNR определяет дальность связи независимо от символьной скорости.

Параметр OSNR – это отношение мощности сигнала к мощности шума в фиксированной полосе, используемой при измерении прибором OSA (Optical Spectrum Analyzer), не зависящей от полосы полезного сигнала. Обычно используется полоса 0,1 нм, что соответствует 12,5 ГГц на длине волны 1550 нм.

Величина OSNR при постоянной мощности сигнала не зависит от символьной скорости: при фиксированном OSNR дальность связи уменьшается с увеличением символьной скорости.

Если передается много (K) ортогональных (т.е. не взаимодействующих) каналов, то пропускная способность увеличивается в K раз. Передача данных в одном направлении по K каналам называется мультиплексированием. Например, если используются две ортогональные поляризации, это поляризационное мультиплексирование (только две поляризации ортогональны). Если каналы разделены пространственно, это пространственное мультиплексирование; если разделены по длине волны оптического излучения, это спектральное мультиплексирование, или мультиплексирование по длинам волн оптического излучения WDM (Wavelength Division Multiplexing),

В соответствии с уравнением Шеннона–Хартли пропускная способность многоканальной ВОСП определяется произведением пропускной способности каждого канала (связана со спектральной эффективностью канала) на количество каналов данных, которые могут передаваться параллельно.

В ВОЛС на основе одномодового волокна максимальное количество DWDM каналов K_{DWDM} определяется отношением полосы пропускания оптического волокна B_{DWDM} к полосе канала B_{Chanal} , умноженным на коэффициент ξ_{DWDM} , определяющий эффективность использования спектра:

$$K_{\text{DWDM}} = \frac{B_{\text{DWDM}}}{B_{\text{Chanal}}} \xi_{\text{DWDM}}.$$

Максимальное значение коэффициента ξ_{DWDM} теоретически может быть равно 1, но практически несколько меньше единицы, что связано в основном с наличием защитных частотных интервалов между полосами каналов.

Поскольку максимальная пропускная способность канала определяется формулой Шеннона:

$$C_{\text{Chanal}} = B_{\text{Chanal}} \log_2 (1 + \text{SNR}_{\text{Chanal}}),$$

то для максимальной теоретической пропускной способности одномодового волокна ($\xi_{\text{DWDM}} = 1$) получаем следующее выражение:

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

За счет одновременного использования двух окон прозрачности, а именно Super C / C++ и Super L / L++, полоса пропускания B_{DWDM} одномодового оптического волокна достигает 12 ТГц.

Для непрерывного увеличения пропускной способности сетей в ближайшие несколько десятилетий потребуются, кроме применения новых видов модуляции, методов цифровой обработки сигналов, увеличения спектральной эффективности и числа DWDM каналов, задействовать еще одно измерение, которое ранее не использовалось, – пространство. Речь идет о пространственном разделении / мультиплексировании (SDM, Space/Spatial Division Multiplexing), когда используется множество пространственно-разделенных оптических каналов.

В настоящее время исследуются возможности нескольких реализаций SDM с использованием:

- многоволоконных кабелей;
- многосердцевинных волокон, отличающихся повышенным количеством независимых сердцевин в поперечном сечении волокна. Конструкция оптического волокна и интервалы между сердцевинами выбираются таким образом, чтобы минимизировать взаимные перекрестные помехи и одновременно сохранить размеры волокна в несколько сот микрон. Если взаимные перекрестные помехи будут незначительны, то параллельно по каждой сердцевине можно организовать независимые каналы передачи. При этом, если использовать многоуровневые форматы модуляции, DWDM-мультиплексирование, поляризационное мультиплексирование и по каждой сердцевине передавать данные со скоростью, близкой к теоретической пропускной способности одномодовых волокон, то по одному такому волокну можно будет достичь скорости передачи в сотни-тысячи терабит в секунду [7];

- маломодовых волокон – это еще один подход к реализации пространственного мультиплексирования, который заключается в организации множества независимых информационных каналов передачи по одной сердцевине, поддерживающей распространение небольшого количества пространственных мод [8].

2. Эволюция форматов модуляции для оптических каналов ВОСП

В самых ранних волоконно-оптических транспортных системах для кодирования двоичной информации 1 и 0 в виде световых импуль-

сов использовались простые схемы модуляции с манипуляцией уровнем интенсивности оптического излучения ООК (On-OFF Keying). Это были каналы передачи данных со скоростью передачи порядка 2,5 и 10 Гбит/с с сеткой частот оптических каналов 100 ГГц (0,8 нм) или 50 ГГц (0,4 нм). В оптических каналах со скоростью передачи 40 Гбит/с использовался не формат ООК (манипуляция уровнем оптической мощности), а дифференциальные двух- и четырехуровневые форматы с фазовой манипуляцией DBPSK или DQPSK [9].

Для дальнейшего увеличения пропускной способности потребовался переход к QAM-модуляции, при которой двоичная информация (символы сигнала) передается с использованием не только амплитуды (интенсивности), но и фазы оптического излучения. Когерентные системы связи начали стремительно развиваться с 2005 г. после демонстрации первых когерентных приемников с цифровой обработкой сигналов. Интерес к ним обусловлен возможностями реализации в ВОСП множества разнообразных многоуровневых форматов модуляции [10, 11].

С тех пор технология когерентной оптической передачи преодолела несколько качественных изменений в связи с переходом:

- от каналов с пропускной способностью 2.5G/10G/40G к каналам 100G и выше, т.е. к B100G (Beyond 100G). На смену транспондерам со скоростью 40 и 100G, использующим формат модуляции DP QPSK, пришли транспондеры со скоростями 200, 400G и более, использующие многоуровневые форматы модуляции DP 16QAM, DP 32QAM и DP 64QAM;
- от приемников с жестким принятием решений (Hard Decision) и последующим исправлением ошибок с использованием алгоритмов HD FEC к приемникам с мягким принятием решений (Soft Decision) и последующим исправлением ошибок с использованием алгоритмов SD FEC.

Существенную роль в когерентных системах связи играет кодирование с использованием алгоритмов исправления ошибок FEC (Forward Error Correction). Прямая коррекция ошибок (FEC) – это метод цифровой обработки сигналов, заключающийся в передаче дополнительных данных, не несущих полезную нагрузку, а использующихся для поиска и исправления ошибок в полезной информации [12, 13]. Для исправления ошибок в этом случае не требуется запрос повторной передачи данных.

Если количество ошибок при передаче находится в пределах корректирующей способности FEC, то декодер FEC, расположенный на приемной стороне канала, обнаружит и исправит ошибки.

В результате можно увеличить дальность связи без регенерации сигнала, т.е. без промежуточного ОЕО-преобразования сигнала.

Приемники с жестким принятием решений (HD) по измеренным значениям амплитуды и фазы принимают однозначное решение о значении каждого принятого символа.

Приемники с мягким принятием решений (SD) по измеренным значениям амплитуды и фазы не принимают однозначное решение о значении каждого принятого символа, а передают в блок программной обработки данные, дополненные информацией о том, насколько близко значение символа было к пороговому значению. Для этого используется сравнение с несколькими порогами. Например, при использовании трех порогов при детектировании бинарного сигнала приемник относит принятый символ к одной из четырех групп:

- с большой вероятностью единица;
- с малой вероятностью единица;
- с большой вероятностью ноль;
- с малой вероятностью ноль.

Благодаря дополнительной информации алгоритм исправления ошибок SD FEC работает эффективнее, чем HD FEC.

Примеры форматов QAM модуляции и соответствующее им количество бит на символ, обычно используемых в когерентных каналах ВОСП, представлены на рис. 2.

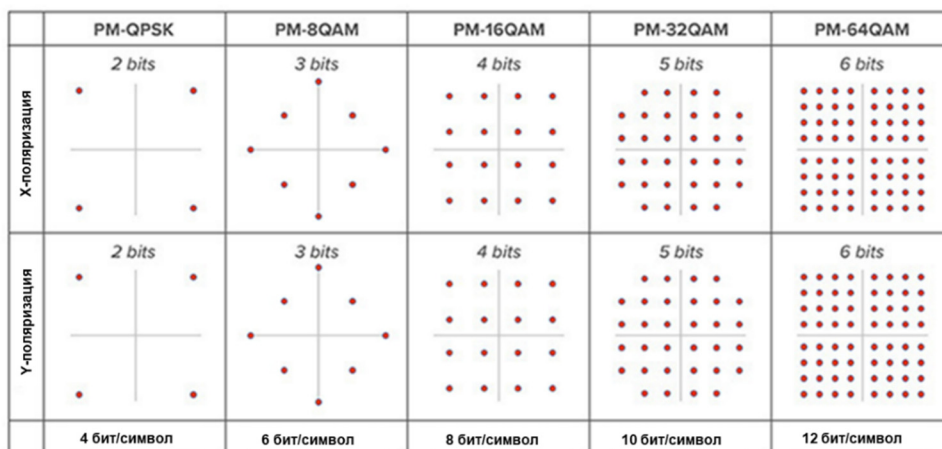


Рис. 2. Форматы QAM модуляции и количество бит на символ на каждую поляризацию [14]; символическая эффективность (количество бит на символ) удваивается за счет использования двух поляризаций оптического линейного сигнала

Каждую точку созвездия формата модуляции 16QAM (всего 16 точек) можно описать 4-значным двоичным числом (обычно для этого используется двоичный код Грея). Каждая точка созвездия представляет собой уникальную комбинацию двух квадратур – проекций на горизонтальную ось (синфазная компонента) и на вертикальную ось (квадратурная компонента).

Заключение

Существуют два направления развития оптических каналов современных волоконно-оптических систем передачи ВОСП OTN/DWDM:

- увеличение символьной скорости;
- увеличение количества значений, принимаемых символами, т.е. переход к форматам модуляции более высокого порядка.

Увеличение символьной скорости повышает экономичность систем связи, не уменьшая дальность связи, но и не увеличивая достижимую скорость передачи информации.

Переход к форматам модуляции более высокого порядка увеличивает достижимую скорость передачи информации, но ограничивает максимальную дальность связи.

Взаимосвязь форматов модуляции, дальности связи, спектральной эффективности и символьной скорости оптических каналов ВОСП OTN/DWDM будет подробнее рассмотрена позднее.

Список литературы

1. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия / В.А. Конышев, А.В. Леонов, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 15–27.

2. Meeting the demand for optical bandwidth over the next decade [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nokia.com/blog/meeting-the-demand-for-optical-bandwidth-over-the-next-decade> (дата обращения: 25.12.2023).

3. What the FEC [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec> (дата обращения: 23.12.2023).

4. Nearing the Shannon Limit: terabit coherent optical networks [Электронный ресурс]. – URL: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2082 (дата обращения: 26.12.2023).

5. Statistical assessment of open optical networks [Электронный ресурс] / E. Virgillito, A. Ferrari, A. D'Amico, V. Curri. – URL: https://www.researchgate.net/publication/344745779_Statistical_Assessment_of_Open_Optical_Networks (дата обращения: 14.01.2024).

6. Amplified spontaneous emission [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission> (дата обращения: 14.01.2024).

7. Кусайкин, Д. Волокна будущих петабитных сетей [Электронный ресурс] / Д. Кусайкин. – URL: <https://nag.ru/material/30950> (дата обращения: 14.01.2024)

8. Одно/мало/много-модовые волокна, в чем соль [Электронный ресурс] / Д. Кусайкин. – URL: <https://nag.ru/material/31187> (дата обращения: 14.01.2024).

9. Наний, О.Е. Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с / О.Е. Наний, В.Н. Трещиков // 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. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев // Фотон-экспресс. – 2019. – Vol. 160, № 8. – С. 4–7.

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

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

14. Baud rate, modulation, and maximizing coherent optical performance [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Baud-Rate-Modulation-and-Maximizing-Coherent-Optical-Performance-0294-WP-RevA-0921.pdf> (дата обращения: 16.01.2024).

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 communication 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 25 December 2023).

3. What the FEC, available at: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec> (accessed 23 December 2023).

4. Nearing the Shannon Limit: terabit coherent optical networks, available at: https://www.lightreading.com/webinar.asp?webinar_id=2082 (accessed 26 December 2023).

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 14 January 2024).

6. Amplified spontaneous emission, available at: <https://www.fiberlabs.com/glossary/amplified-spontaneous-emission> (accessed 14 January 2024).

7. Kusaikin D. Volokna budushchikh petabitnykh setei, available at: <https://nag.ru/material/30950> (accessed 14 January 2024).

8. Kusaikin D. Odno/malo/mnogo-modovye volokna, v chem sol', available at: <https://nag.ru/material/31187> (accessed 14 January 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 pokole-nii i sovmestimye algoritmy FEC [Evolution of solutions with error detection and correction in OTN/DWDM optical channels. Part 2. Generational evolu-tion and FEC compatible algorithms]. *Last Mile*, 2023, no. 8, pp. 52-58.

14. Baud rate, modulation, and maximizing coherent optical perfor-mance, available at: <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/Baud-Rate-Modulation-and-Maximizing-Coherent-Optical-Performance-0294-WP-RevA-0921.pdf> (accessed 16 January 2024).

Сведения об авторах

КОГАН С.С.

e-mail: kogan@t8.ru

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, советник генерального директора производственной компании ООО Т8 по формированию техни-ческой стратегии, г. Москва/г. Санкт-Пе-тербург, Российская Федерация.

НАНИЙ О.Е.

e-mail: naniy@t8.ru

Доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, заместитель ге-нерального директора производственной компании ООО Т8 по научной работе, г. Москва, Российская Федерация.

ТРЕЩИКОВ В.Н.

e-mail: vt@t8.ru

Доктор технических наук, генеральный директор производственной компании ООО Т8, г. Москва, Российская Федера-ция.

About the authors

S.S. KOGAN

e-mail: kogan@t8.ru

Ph. D in telecommunication, Advisor to the General Director on the formation of a tech- nical strategy of T8 LLC, Moscow & Saint Petersburg, Russian Federation.

O.E. NANIY

e-mail: naniy@t8.ru

Doctor of Physical and Mathematical Sci- ences, Professor, Faculty of Physics, Mos- cow Lomonosov University, Deputy Gen- eral Director for scientific work of T8 LLC, Moscow, Russian Federation.

V.N. TRESHCHIKOV

e-mail: vt@t8.ru

Doctor of Technical Sciences, General Di- rector of T8 LLC, Moscow, Russian Feder- ation.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Получена: 08.02.2024

Одобрена: 10.02.2024

Принята к публикации: 12.02.2024

Financing. The study was not sponsored.

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

The authors' contribution is equal.

Received: 08/02/2024

Approved: 10/02/2024

Accepted for publication: 12/02/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Коган, С.С. Высокоскоростные оптические каналы перспективных волоконно-оптических транспортных сетей OTN/DWDM / С.С. Коган, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 1. – С. 84–98.

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. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 84-98.