Analysis of Critical Parameters of Promising Optical Interfaces of High-Speed Telecommunication Systems

L.N. Isaeva
Moscow Technical University of Communications and Informatics
Moscow, Russia
l.n.isaeva@mtuci.ru

A.V. Lobzov
Moscow Technical University of Communications and Informatics
Moscow, Russia
a.v.lobzov@mtuci.ru

S.S. Kogan
LLC «T8»
St-Peterburg, Russia
kogan@t8.ru

***Abstract*—В настоящей статье рассматриваются параметры оптических интерфейсов, критичных при передаче перспективных высокоскоростных клиентских цифровых потоков со скоростями 100 Гбит/с и выше. Выявлены и исследованы параметры линейных сигналов оптических каналов: формат модуляции, символьная скорость, ширина спектра оптического канала, уровень оптической мощности линейного сигнала на входе оптического участка сети (выходной уровень оптической мощности оборудования), отношение сигнал/шум для сигнала на выходе оптического участка сети, в основном влияющие на достижение скоростей передачи при требуемой дальности связи без использования промежуточных узлов регенерации. Приведены примеры стандартизации высокоскоростных оптических интерфейсов. Рассмотрены вопросы проведения испытаний параметров оптических интерфейсов высокоскоростных средств связи.**

Keywords—оптические интерфейсы; модуляция; 800G; отношение сигнал/шум; испытания

I. Введение

Создание клиентских соединений на уровне 10GE (Gigabit Ethernet), 25GE, 40GE и 100GE были важными этапами развития высокоскоростной передачи данных по каналам средств связи с применением технологии Ethernet. При этом интервалы времени между переходом средств связи на новые скорости передачи данных сокращались и составляли порядка 10-ти лет между 10GE и 25GE, порядка 3-х лет между 40GE и 100GE. Интерфейс 25GE в основном используется на уровне Fronthaul радиодоступа, а также для подключения серверов. Интерфейс 40GE широко использовался для сетей доступа, потом стал заменяться на 100GE.

По каналам современных оптоволоконных транспортных сетей OTN (Optical Transport Network) /DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) на одной или нескольких оптических несущих передаются в основном клиентские цифровые потоки 100GE, которые постепенно дополняются трафиком 400GE, 800GE, а в перспективе 1.2/1.6 Тбит/с. Причиной этой тенденции является развитие облачных приложений, построенных на основе искусственного интеллекта AI (Artificial Intelligence) и машинного обучения ML (Machine Learning) и требующих наибольшей пропускной способности. В таких сетях должен быть обеспечен эффективный обмен данными между ЦОД-ами (Центрами Обработки Данных), которые являются источниками и приемниками большей части трафика в глобальной облачной экономике [1]. Также каналы DWDM возможно использовать для работы перспективных систем квантового распределения ключа / Quantum Key Distribution (КРК / QKD), которые требуют надежную передачу данных [2, 3], В настоящее время в ЦОД-ах используются преимущественно оптические интерфейсы с пропускной способностью до 100G, но возникающие новые потребности в обеспечении взаимодействия программных приложений и зеркалирования хранимых в ЦОД-ах данных стимулируют увеличение скорости передачи с переходом к использованию, как минимум, оптических интерфейсов 400G.

Данная статья посвящена анализу параметров линейных сигналов оптических каналов критичных при передаче клиентских цифровых потоков со скоростями 400G и 800G. Рассмотрены вопросы проведения испытаний параметров оптических интерфейсов высокоскоростных средств связи.

II. Параметры линейных сигналов оптических каналов для передачи высокоскоростных клиентских цифровых потоков

Для обеспечения скоростей передачи 400 Гбит/с, 800 Гбит/с и, в перспективе, 1.2/1.6 Тбит/с по оптическим каналам с достижением требуемой дальности связи без использования промежуточных узлов регенерации с OEO (Optical-Electrical-Optical) преобразованием, необходимо правильно выбрать и проверять следующие параметры линейных сигналов оптических каналов:

- формат модуляции;
- символьная скорость;
- ширина спектра оптического канала;

- уровень оптической мощности линейного сигнала на входе оптического транспортного участка сети OTS (Optical Transport Section) - выходной уровень оптической мощности оборудования;
- отношение сигнал/шум OSNR (Optical Signal Noise Ratio) для сигнала на выходе оптического транспортного участка сети OTS.

A. Формат модуляции

Под форматом модуляции подразумевается выбор различных фазовых и амплитудных соотношений для оптической синусоидальной несущей с целью передачи различных символов, причем каждому символу соответствует определенный набор передаваемых бит данных. Для передачи сигналов по каналам оптоволоконных транспортных систем связи применяют разнообразные форматы модуляции, например, NRZ, PAM4, QPSK, 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM. При этом для каналов с относительно небольшой пропускной способностью порядка 10G, 25G и 40G используется в основном формат модуляции NRZ с манипуляцией уровнем интенсивности оптического сигнала ~~канала~~, а для каналов с пропускной способностью порядка 100G – когерентная квадратурная фазовая манипуляция каждой из двух поляризаций оптического сигнала, получившая наименование DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase-Shift Keying) или PM-QPSK (Polarization Multiplexing Quadrature Phase-Shift Keying) с передачей двух бит на символ по каждой поляризации линейного сигнала. Уровень N формата модуляции QAM (Quadrature Amplitude Modulation), а именно, количество точек звездной диаграммы с определенным сочетанием значений интенсивности и фазы линейного оптического сигнала, определяется количеством бит, передаваемым каждым символом. При определении уровня QAM это число как правило соответствует степени числа два.

В перспективных решениях с оптическими каналами 400G и 800G рассматриваются более высокие уровни форматов модуляции QAM. Например, формат 8QAM соответствует передаче 3-х бит на символ, 16QAM – 4-х бит и т.д. При переходе к более высокому уровню QAM дальность связи уменьшается в обратной пропорции к уровню QAM, поскольку, при сохранении уровня оптической мощности линейного сигнала, символы звездной диаграммы QAM (отображают значение фазы и амплитуды символов) сближаются друг с другом (евклидово расстояние между ними уменьшается) и для их правильного различения на приемной стороне в оптическом канале потребуется поддерживать более высокое значение отношения сигнал/шум (SNR - Signal/Noise Ratio,) [1]. Следует учитывать, что при передаче сигнала по оптоволокну уровень его оптической мощности падает за счет рассеяния. Для восстановления уровня сигнала можно использовать оптические усилители, но они усиливают не только полезный сигнал, но и попадающие на его вход шумы. Поэтому при передаче сигнала на значительные расстояния, даже при использовании оптических усилителей, соотношение сигнал/шум непрерывно ухудшается и, в какой-то момент, количество вызванных шумами ошибок становится неприемлемым. При увеличении уровня оптической мощности полезного сигнала на входе оптического участка сети выше определенного порога, резко начинают расти вносимые нелинейные искажения. То есть в оптических каналах начинают ощутимо возрастать также и межканальные помехи. В системах DWDM данное ограничение распространяется на групповой сигнал (группу оптических каналов) в целом и, таким образом, максимальный уровень оптической мощности в каждом отдельном канале существенно ограничивается. Именно нелинейные взаимодействия между каналами в значительной мере ограничивают протяженность оптических каналов и не позволяют достичь пределов Шеннона по пропускной способности современных систем OTN/DWDM.

В последнее время разработано несколько методов дополнительной обработки (формирования) формата линейного сигнала с целью преодоления ограничений, связанных с нелинейными взаимодействиями между оптическими каналами и приближения к предельным характеристикам каналов по Шеннону. Среди этих методов наиболее известны

- гибридная модуляция линейного сигнала с временным разделением TDHMF [4] или дробная QAM (Fractional QAM) с адаптивно изменяемой символьной скоростью (ABR, Adaptive Baud Rate) Последний вариант был предложен и реализован компанией Acacia/CISCO во встроенном линейном интерфейсном когерентном модуле AC1200
- вероятностная обработки линейного сигнала типа PCS (Probabalitic Constallation Shaping). Этот метод был впервые разработан специалистами политехнического института в г. Мюнхене (Германия) и доведен до практического воплощения учеными Nokia Bell Labs Был реализован в модуле (ЦСП) PSE-V компании NOKIA, а затем в интерфейсных модулях (ЦСП) компаний Infinera и Acacia/CISCO.

Целью разных предложений по дополнительной (в том числе и вероятностной) обработке линейного сигнала в формате QAM, является, кроме всего прочего, переход от целочисленных (являющихся степенью числа 2) к дробным (отсюда и возник термин “Fractional”) значениям формата QAM с целью создания эквивалентной «плавной шкалы» для количества точек и вероятности их появления на звездной диаграмме сигнала QAM. Подобная обработка позволяет достичь оптимального сочетания параметров дальности (без OEO) и пропускной способности оптических каналов системы OTN/DWDM [5].

Наиболее известен перспективный метод PCS вероятностной обработки точек звездной диаграммы сигнала с QAM модуляцией. Специалистами отмечены более высокие характеристики PCS по сравнению с

другими методами формирования созвездия QAM, что дополняется возможностью подстройки вероятностных характеристик PCS с учетом параметров реального канала связи [6].

Существенно влияют на характеристики передачи данных по оптическим каналам также и методы выявления и исправления ошибок передачи. Для поддержания высокого качества (то есть низкой частости появления ошибок) передачи полезного сигнала по оптическим каналам рекомендовано использовать разнообразные коды FEC (Forward Error Correction) с обнаружением и исправлением ошибок в соответствии с ITU-T G.709/Y.1331 [7]. Например, для оптических каналов большой протяженности с пропускной способностью 100G и выше рекомендован staircase FEC (SC FEC). В этом случае цикл (кадр) OTU (Optical Transport Unit) OTN линейного сигнал в соответствии с ITU-T G.709.2/Y.1331.2 [8] получил наименование OTU-4-SC. Применение OTN структуры OTU-4-SC (HD-SC FEC) для каналов 100G подразумевает размер заголовка (overhead) оптического транспортного блока OTU до 7% от общего объема передаваемых по оптическому каналу данных за счет включения в состав заголовка (overhead) цикла дополнительных байтов FEC. Результирующее кодовое усиление для SC FEC составляет порядка 8.35 дБ для канала с аддитивным белым гауссовым шумом. Кодовое усиление соответствует разнице между значениями отношения сигнал/шум на приемной стороне в системе без FEC и с FEC. Это означает, что при использовании SC FEC можно допустить более низкое отношение сигнал/шум в оптическом канале при той же дальности связи.

При использовании программно-определяемого кода SD FEC размер заголовка (overhead) количество байтов заголовка увеличивается до 20% (вместо упомянутых выше 7%), но при этом достигается кодовое усиление до 9.5 - 10 дБ, что соответствует увеличению дальности связи на 20 – 40 % по сравнению с отсутствием функционала FEC в оптическом канале.

На существующих высокоскоростных оптических транспортных сетях в основном используют следующие форматы модуляции [9]:

- PM-QPSK - для протяженных магистральных (Backbone) оптических транспортных сетей с дальностью связи по оптическим каналам 100G порядка 3000 км;
- PM-16QAM – для городских (METRO) оптических транспортных сетей с дальностью связи по оптическим каналам 200G порядка 800 км.

B. Символьная скорость

В линейном сигнале оптического канала (линейном коде) символьная скорость - это количество изменений символов или изменений формы сигнала или событий, связанных с сигналом в среде передачи (например в оптоволокне) в единицу времени. Каждый символ оптического линейного сигнала может представлять или передавать один или несколько битов данных. Для современных оптических транспортных систем с каналами 100 Гбит/с и выше под этим параметром понимается скорость передачи символов линейного формата с QAM модуляцией разных порядков.

Масштабирование символьной скорости стало возможным благодаря внедрению новых технологий и увеличению скорости преобразования ЦАП (цифро-аналоговое преобразование)/АЦП (аналогово-цифровое преобразование) с 56 ГБод в 2010 году до 150 ГБод и более в существующих цифровых сигнальных процессорах DSP (Digital Signal Processor), а также расширению электрической полосы пропускания/быстродействия чипов с 16 ГГц в 2010 г. до более 30 ГГц в существующих ЦСП/DSP. Поскольку помехоустойчивость передаваемого сигнала уменьшается с переходом к более высоким уровням QAM модуляции, то требуется постоянное улучшение доступного разрешения ЦАП/АЦП с точки зрения эффективного числа битов (ENOB - Effective Number Of Bits), формируемых АЦП. Кроме того, использование более сложных схем DSP и FEC требовало улучшения качества интеграции компонентов при уменьшении размера технологических узлов СБИС (ASIC). Наблюдается переход от толщины пленок порядка 65 нм до 5 и даже 2-3 нм в следующих поколениях модулей ЦСП, на КМОП (CMOS) технологии [10].

Более высокое значение ENOB означает, что уровни напряжения, зафиксированные в процессе работы АЦП, являются более точными. Разрешение, реализуемое в АЦП, определяется количеством битов на его выходе, используемых для представления значения отсчета аналогового сигнала на его входе. ENOB описывает эффективное разрешение АЦП в битах, а также используется в качестве меры качества для других блоков, таких как устройств взятия и удержания отсчетов (хранения) аналогового сигнала на входе АЦП. Таким образом, качество работы аналоговых блоков может быть учтено в расчетах цепи передачи или обработки сигналов. В общем случае значение ENOB для цепочки функциональных блоков обычно меньше, чем ENOB для наихудшего блока в этой цепочке.

Идеальный АЦП имеет совершенно линейную характеристику и просто квантует отсчеты входного аналогового сигнала по амплитуде. Процесс квантования вносит шумы квантования. Используя мощность сигнала и мощность шума, можно получить отношение сигнал/шум для сигнала после АЦП.

Если в качестве входного сигнала используется полномасштабная (на весь диапазон входного сигнала) синусоида, то количество бит, реализуемых в коде на выходе АЦП, можно записать так [11]

$$B \approx \frac{SNR - 1.76}{6.02} \qquad (1)$$

где, SNR - отношение сигнал/шум в дБ.

Это уравнение показывает, как эквивалентное количество битов на выходе АЦП может быть определено

с учетом отношения сигнал/шум. Этот результат и есть параметр ENOB. Для идеального АЦП значение параметра B всегда выражается положительным целочисленным значением. Для неидеального АЦП значение параметра B может быть любым положительным действительным (возможно и дробным) числом. На практике идеальных АЦП не существует. Каждый АЦП вносит некоторые искажения во входной сигнал. Типичными искажениями являются аддитивный шум в аналоговом сигнале на входе АЦП, нелинейная амплитудная характеристика самого АЦП, а также ошибки, связанные с усилением и смещением сигнала. Наличие шумовой составляющей напрямую влияет на ухудшение параметра отношения сигнал/шум АЦП. Нелинейность амплитудной характеристики АЦП приводит к возникновению новых гармонических составляющих, которые также снижают значение SNR.

АЦП может иметь 12-битное разрешение, но эффективное число битов при использовании в системе может быть равным 9,5, или 10.5 или соответствовать другому целому или дробному значению, меньшему чем число 12. В зависимости от используемой в АЦП функциональности ENOB также может зависеть от частоты входного сигнала. На высоких частотах входного сигнала, например, возможен рост нелинейности характеристики квантования АЦП, что приводит, соответственно, к ухудшению ENOB.

Порядок значений символьной скорости с учетом передачи в заголовке цикла OTN OTU линейного сигнала до 20% дополнительных служебных данных для коррекции ошибок (при использовании программно-определяемого SD FEC) составляет [1, 9, 10]:

- для каналов 100G на одной несущей: 32 ГБод для формата модуляции PM-QPSK;
- для каналов 400G на одной несущей: 64 ГБод для формата модуляции PM-16QAM, 128 ГБод для формата модуляции PM-QPSK;
- для каналов 800G на одной несущей: 96 ГБод для формата модуляции PM-32QAM, 128 ГБод для формата модуляции PM-16QAM, 256 ГБод для формата модуляции PM-QPSK;
- для каналов с пропускной способностью порядка 1.2/1.6 Тбит/с: 128 ГБод для формата модуляции PM-64QAM, 92 ГБод для формата модуляции PM-32QAM, 256 ГБод для формата модуляции PM-16QAM.

Развитие технологий показывает, что:

- каждые 2-4 года символьная скорость повышается примерно в 1.5 раз;
- каждые 5-8 лет символьная скорость удваивается.

C. Ширина спектра оптического канала

Переход к более высоким символьным скоростям в оптических приемопередатчиках для увеличения дальности передачи и снижения стоимости каждого передаваемого бита данных приводит к расширению полосы частот (длин волн) для каждого оптического канала, что, в свою очередь, вызывает потребность в создании системы с более широкой полосой пропускания для оптических каналов или с более широким взаимным разносом каналов по длинам волн для соседних оптических каналов.

Увеличение символьной скорости влечет за собой расширение спектра оптического канала от текущего 50 ГГц до 75 ГГц для оптического канала 400G и 150 ГГц для оптического канала 800G [1].

Ширина спектра оптического канала, равная 150 ГГц, рассматривается в настоящее время как следующий эволюционный шаг для будущих линейных сетевых архитектур с более высокой пропускной способностью, поскольку позволит удвоить пропускную способность оптического канала (с удвоением символьной скорости) по сравнению с текущими реализациями оптического канала с полосой 75 ГГц. Линейная система, приспособленная к оптическим каналам с широкой полосой пропускания, может предоставить оператору сети возможность выбора из несколько методов когерентной передачи. Уменьшая порядок модуляции и удваивая символьную скорость, можно увеличить пропускную способность канала и обеспечить передачу на гораздо большее расстояние. Канальный план с разносом каналов с шагом 150 ГГц будет соответствовать более высокой символьной скорости.

В более ранних поколениях сетей DWDM использовались оптические каналы с фиксированной сеткой частот равной 50 и 100 ГГц. Чтобы перейти к перспективным системам передачи и свести к минимуму неиспользуемые частотные интервалы, операторы сетей стремятся разместить оптические каналы с расширенным спектром в гибкой сетке частот FlexGrid в соответствии с ITU G.694.1 “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid” (10/2020) или в фиксированной сетке частот, кратной традиционным частотным планам, например, кратным двум полосам 75 ГГц [12].

D. Выходной уровень оптической мощности

Совокупные оптические потери в оптоволоконной линии складываются из трех составляющих: потери на оптоволоконных соединителях, потери в оптических муфтах и потери на метраже оптоволоконного кабеля. Зная конфигурацию сегмента, можно рассчитать максимально оптические потери в нем [13].

Оптические транспортные сети DWDM ориентированы на использование для оптических каналов (длин волн) приемопередатчиков с высокой выходной мощностью от 0 до 3 дБм (то есть от 1 до 2 мВт), при которой не требуется регенерация сигнала с OEO преобразованием после прохождения несколько сетевых узлов как в городских (Metro) сетях, так и в магистральных сетях большой протяженности (Long Haul).

В конфигурации варианте «IP-over-DWDM» предусматривается размещение линейных

приемопередатчиков в маршрутизаторах или пакетных коммутаторах для формирования оптических каналов (длин волн) с малой выходной мощностью (порядка -10 дБм), достаточной для соединения точка-точка с минимальным расстоянием между узлами.

Для перспективных когерентных каналов с пропускной способностью 400G и выше планируют применять когерентные оптические приемопередатчики, поддерживающие минимальный уровень выходной оптической мощности порядка 0 дБм [1].

E. Отношение сигнал / шум

Для сигналов DWDM в мощность шума существенный вклад вносят оптические усилители EDFA. В общем случае величина отношения сигнал/шум внутри оптического канала определяется как [16]:

$$OSNR = 10\log\frac{P_i}{N_i} + 10\log\frac{B_m}{B_r}, dB \qquad (2)$$

где:

P_i – мощность оптического сигнала в Вт, передаваемого внутри полосы пропускания оптического канала;

N_i – мощность шума в Вт на длине волны оптического сигнала;

B_m – ширина оптического спектра в нм или ГГц, занимаемая оптическим каналом;

B_r – относительная ширина оптического спектра в нм или ГГц, в которой рассчитывается шум.

Все измерительные приборы имеют разную разрешающую способность, поэтому рекомендуется нормировать шум, приняв B_r = 0.1 нм.

III. Стандартизация линейных интерфейсов 400G и 800G

В последнее время стандартизированы или готовятся к стандартизации в OIF (Optical Internetworking Forum) линейные интерфейсы 400G и 800G [15, 17]:

a. OIF 400ZR (символьная скорость порядка 60 ГБод), совместимый интерфейс оптического канала, обозначаемый как 400GBASE-R PHY и отличающийся:
   - ✓ скоростью передачи данных 400 Гбит/с;
   - ✓ форматом когерентной модуляции DP-16QAM на одной длине волны;
   - ✓ ЦСП / DSP, поддерживающим в составе модуля не дифференциальное (Non-Differential) амплитудно-фазовое кодирование/декодирование;
   - ✓ Concatenated FEC (CFEC) в составе формируемого в модуле линейного сигнала (длины волны);
   - ✓ частотным интервалом 75 ГГц между центральными частотами (длинами волн) соседних оптических каналов;
   - ✓ OSNR ≤ 26 дБ;
   - ✓ передаваемой выходной мощностью ≥ -10 дБм;
   - ✓ принимаемой оптической мощностью ≥ -12 дБм.

b. Модули 400G OpenROADM [15] для линейных интерфейсов 400G отличаются тем, что в них
   - ✓ скорость передачи данных 400 Гбит/с на одной длине волны;
   - ✓ поддерживаются интерфейсы GbE и OTN,
   - ✓ используется открытый FEC (oFEC), который превосходит по характеристикам конкатенированный FEC (cFEC), применяемый в 400ZR. Механизм oFEC обеспечивает параметр Coding gain 11,1 дБ для (DP-QPSK) и 11,6 дБ для DP-16QAM) с порогом по частости появления ошибок (BER) в линии (до FEC) 2,0×10-2. Суммарная задержка кодера и декодера oFEC составляет менее 3 мкс.
   - ✓ используются сменные модули CFP2-DCO, разработанные специально для транспондеров.
   - ✓ более энергоемкие и для их работы требуется больше места, чем для модулей QSFP-DD и OSFP, но они полностью взаимозаменяемы между производителями

c. 800ZR совместимый одноканальный когерентный интерфейс оптического канала, обозначаемый как 800ZR-OFEC-16QAM и отличающийся:
   - ✓ скоростью передачи данных 800 Гбит/с на одной длине волны;
   - ✓ нацеленностью на обеспечение взаимодействия между ЦОД-ами с дальностью связи в пределах 80 км;
   - ✓ использованием в однопролетных сетевых конфигурациях "точка-точка" с оптическими усилителями и частотным интервалом 150 ГГц между центральными частотами (длинами волн) соседних оптических каналов;
   - ✓ поддержкой клиентских интерфейсов 100GE/200GE/400GE/800G-ETC и передачей их через линейный оптический интерфейс до 800G на одной несущей с ошибками менее 1.0E-15;

- ✓ использованием в линейном сигнале недифференциального (Non-Differential) формата модуляция DP-16QAM;
- ✓ использованием кода Open FEC (OFEC) для обнаружения и исправления ошибок;
- ✓ размещением по процедуре GMP до 8x100G ZR-клиентских сигналов в цикле (кадре) линейного сигнала;
- ✓ использованием транспортного контейнера FLEXO-8e при формировании линейного сигнала.

d. 800LR (интерфейс в стадии разработки в OIF) совместимый одноканальный когерентный интерфейс оптического канала, являющийся следующим поколением когерентных оптических интерфейсов, отличающийся:

- скоростью передачи данных 800 Гбит/с на одной длине волны;
- сверхнизкой задержкой, низким энергопотреблением и низкой сложностью;
- нацеленностью на обеспечение взаимодействия между ЦОД-ами с дальностью связи в пределах 10 км;
- использованием в однопролетных сетевых конфигурациях "точка-точка" без усилителей с потерями по уровню мощности на оптическом участке порядка 6-8 дБ;
- поддержкой клиентских подключений 400GE и 800G-ETC;
- использованием кодов с обнаружением и исправлением ошибок типа CFEC с RS (544 514) и BCH (126 110).

e. Для поддержки скорости передачи 1.2/1.6 Тбит/с предполагается использовать съемный модуль – трансивер OSFP-XD

IV. Особенности проведения испытаний параметров оптических интерфейсов высокоскоростных средств связи

Задачи измерения вышерассмотренных оптических параметров возникают на различных этапах жизненного цикла средств связи: производство, подтверждение соответствия, эксплуатация.

Для измерений оптических параметров целесообразно применять современные средства измерений, которые способны обнаруживать в сигнале DWDM шум при измерении уровня сигнала на длине волны оптического канала. Измерение параметров оптических сигналов с линейными скоростями выше 100G, способны производить высокоскоростные анализаторы оптического спектра, такие как MS9740B (Antitsu), OSA-710 (VIAVI), BOSA 400 (ARAGON PHOTONICS).

Обнаружение шума может быть выполнено следующими методами [18].

При методе обнаружения шума, показанном на рисунке 1, шум измеряется в точке, определенной как точка шума. Мощность оптического сигнала, передаваемого внутри полосы пропускания оптического канала, вычисляется по формуле:

$$P_i = P_\lambda - N_\lambda, W \qquad (3)$$

где:

P_λ – мощность оптического сигнала в Вт на длине волны оптического канала;

N_λ – мощность шума в Вт на длине волны оптического канала;

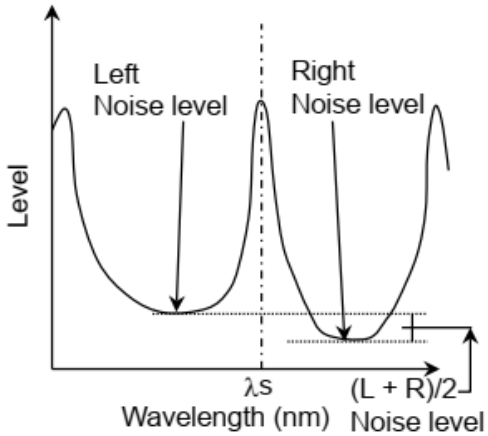

Рис. 1

При методе обнаружения шума, показанном на рисунке 2, шум измеряется из аппроксимирующей кривой на длине волны сигнала (аппроксимирующая кривая вычисляется из шумовой характеристики в области шума). Мощность оптического сигнала, передаваемого внутри полосы пропускания оптического канала, вычисляется по формуле:

$$P_i = \sum_{k=0}^{n} \{P_k - N_\lambda\} * \frac{S_{pan}}{S_{ampl} - 1} * \frac{\alpha}{AR_k}, W \qquad (4)$$

где:

n – количество точек данных в диапазоне интервала сигнала (*Span*);

Span – интервал сигнала в нм;

Sampl – точка выборки;

Pk – мощность в Вт в k-й точке данных;

Nk – мощность в Вт k-й точке шума

AR_k – фактическое разрешение *k*-й точки данных,

α – коэффициент коррекции мощности в зависимости от оборудования.

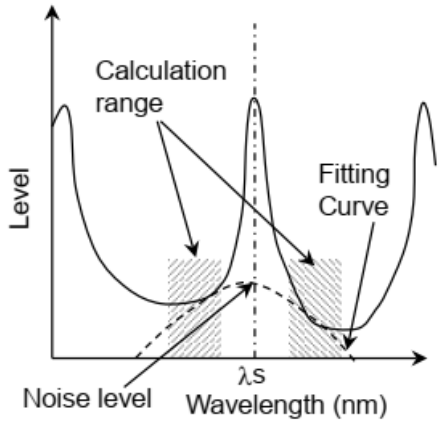

Рис. 2

V. Выводы

В настоящей статье проведен анализ параметров линейных сигналов оптических каналов критичных при передаче клиентских цифровых потоков со скоростями 400G и 800G. Выявлены и исследованы параметры линейных сигналов оптических каналов: формат модуляции, символьная скорость, ширина спектра оптического канала, уровень оптической мощности линейного сигнала на входе оптического участка сети OTS (выходной уровень оптической мощности оборудования), отношение сигнал/шум для сигнала на выходе оптического участка сети OTS (OSNR), в основном влияющие на достижение скоростей передачи 400 Гбит/с, 800 Гбит/с и, в перспективе, 1.2/1.6 Тбит/с по оптическим каналам при требуемой дальности связи без использования промежуточных узлов регенерации.

Приведены примеры стандартизации линейных интерфейсов 400G и 800G в OIF и Open ROADM. Для измерений оптических параметров целесообразно применять современные средства измерений, которые способны обнаруживать в сигнале DWDM шум при измерении уровня сигнала на длине волны оптического канала. Рассмотрены вопросы проведения испытаний параметров оптических интерфейсов высокоскоростных средств связи.

References

[1] J. Homa, «Optical networks move to metro 800G and long haul 400G». [Online]. URL: https://www.5gtechnologyworld.com/optical-networks-move-to-metro-800g-and-long-haul-400g [Accessed July 12, 2022].

[2] .А. Боев 1, С. Воробей, С. Казанцев, М. Керносов, О. Колесников, С. Кузнецов, Ю. Миронов, А. Паршин, Н. Рудавин, «Возможность построения модульной системы квантового распределения ключей в атмосфере» // Письма в Журнал технической физики. 2022.Т. 48. № 15. С. 15–18

[3] Меккель А.М., Оситис А.П. «Квантовые коммуникаци», издательство «Перо», Москва, 2022 год.

[4] Fernando P. Guiomar, Rixin Li, Chris R. S. Fludger, Andrea Carena and Vittorio Curri. «Hybrid Modulation Formats Enabling Elastic Fixed-Grid Optical Networks. Journal of Optical Communications and Networking». Vol. 8, Issue 7, pp. A92-A100, 2016. URL: https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-8-7-A92

[5] Optimize Network Utilization with 3D Shaping. WP Acacia Communications. 2018. URL: https://acacia-inc.com/acacia-resources/optimize-network-utilization-with-3d-shaping/)

[6] (Junho Cho , Member, IEEE, and Peter J. Winzer, Fellow, IEEE, Fellow, OSA. Probabilistic Constellation Shaping for Optical Fiber Communications (invited paper). Journal of Lightwave Technology. Vol. 37, No 6, March 15, 2019).

[7] ITU-T Recommendation G.709/Y.1331 «Interfaces for the optical transport network».

[8] ITU-T Recommendation G.709.2/Y.1331.2. OTU4 long-reach interface.

[9] S. Bailin, W. Huitao, «Ultra-High-Speed Optical Devices for Building High-Performance Optical Infrastructure». [Online]. URL: https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2022/6-en/special-topic--intelligent-e-otn/2.html [Accessed November 16, 2022].

[10] Ultra-Wideband and High Symbol Rate Transmission Systems for Next-Generation Optical Fiber Communications, NOKIA Bell Labs. [Online]. URL: https://theses.hal.science/tel-03738115/document [Accessed June 28, 2021].

[11] The Effective Number of Bits (ENOB) of my R&S Digital Oscilloscope Technical Paper. URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1er03/ENOB_Technical_Paper_1ER03_1e.pdf

[12] 100GBaud+ Silicon Photonics Solutions Drive Optical Network Evolution. Acacia. [Online]. URL: https://acacia-inc.com/acacia-resources/100gbaud-silicon-photonics-solutions-drive-optical-network-evolution [Accessed December 4, 2020].

[13] Сертификация и диагностика волоконно-оптических линий. Связькомплект. [Online]. URL: https://skomplekt.com/sertifikatcia-i-diagnostika-volokonno-opticheskikh-liniy [Accessed December 27, 2022].

[14] 400G ZR vs. Open ROADM vs. ZR+. FS community. URL: URLhttps://view.office apps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fcignal.ai%2Fwp-content%2Fuploads%2F2022%2F09%2F220920-Cignal-TRNEQ-AI-2Q22-ECOC-2022-Market-Focus.pptx&wdOrigin=BROWSELINK

[15] Open ROADM MSA 5.0 W-Port Digital Specificatio (100G-400G), 2021. URД: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2F0201.nccdn.net%2F1_2%2F000%2F000%2F12d%2Fa26%2Fopenroadm_msa-5.0-w-port-digital-specification_20210701.docx&wdOrigin=BROWSELINK

[16] ITU-T Recommendation G.Sup39. Optical system design and engineering considerations..

[17] K. Gass, «Defining 800ZR, 800LR, and Random 400ZR Information. ECOC 2022». [Online]. URL: https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/ECOC-2022-Market-Focus-Gass-final1.pdf [Accessed December 27, 2022].

[18] MS9740B Optical Spectrum Analyzer. Operation Manual.