

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.115.7.56.61

В цикле статей представлены методы мониторинга оптических каналов с использованием двух основных параметров (оптическое отношение сигнал/шум OSNR и Q-фактор) и критерии эффективности кодов с обнаружением и коррекцией ошибок (часть 1), эволюция поколений и совместимые алгоритмы коррекции ошибок FEC (Forward Error Correction), а также линейные сменные оптические модули-трансиверы (приемопередатчики) с функциональностью FEC (часть 2).

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) на основе технологий OTN/DWDM обеспечивают быструю, безопасную и надежную передачу данных на большие расстояния. По мере увеличения скорости передачи все больше факторов ограничивают дальность передачи сигнала: хроматическая дисперсия, нелинейные эффекты, поляризационная модовая дисперсия и т. п.

К основным направлениям развития ВОСП OTN/DWDM относятся увеличение скорости и дальности передачи данных по оптическим каналам. Прямая (или упреждающая) коррекция ошибок FEC (Forward Error Correction) является техникой кодирования/декодирования сигнала

с возможностью обнаружения ошибок и корректировки информации методом упреждения.

FEC резко снижает количество битовых ошибок BER (Bit Error Rate), что позволяет увеличить дальность передачи сигнала по оптическому каналу без регенерации, то есть без преобразования ОЕО (Optical-Electrical-Optical).

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СИГНАЛА В ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ВОСП

Для оценки качества сигнала в оптических каналах используются два основных параметра – оптическое отношение сигнал/шум OSNR и Q-фактор [1].

OSNR – это мера качества сигнала в оптической линии связи, показывающая, насколько

мощность сигнала превышает мощность шума. OSNR – это отношение мощности сигнала к мощности шума оптического канала после прохождения через оптическую сеть. Чем выше значение OSNR, тем лучше качество сигнала в оптическом канале [2].

Параметр OSNR наиболее важен для приемника, поскольку низкое значение OSNR означает, что сигнал не будет обнаружен. Рассчитывается этот параметр как отношение мощности оптического сигнала к мощности шума в пределах определенной полосы пропускания оптического канала. Общая формула для расчета OSNR:

$$\text{OSNR} = 10 \times \log(S/N),$$

где S – мощность сигнала,
N – мощность шума, выраженные в ваттах или милливаттах.

Для измерения параметра OSNR [3] используются оптические анализаторы спектра OSA (Optical Spectrum Analyzer).

Q-фактор (Quality – качество) [4] – параметр, непосредственно отражающий качество сигнала цифровой системы передачи, то есть эта мера является функцией частоты ошибочных битов (BER), мощности сигнала и мощности шума. Под BER понимается отношение количества ошибочных битов к их общему переданному числу. В общем случае Q-фактор рассчитывается как отношение разности средних уровней сигналов двух соседних символов линейного сигнала к стандартному отклонению шума.

В МСЭ-Т G.697 "Optical monitoring for DWDM systems" [2] указано, что измерение Q-фактора занимает промежуточное положение между классическими оптическими параметрами, а именно уровнем оптической мощности, отношением оптического сигнала к шуму OSNR, длиной волны и параметрами цифровой передачи, основанными на BER. Q-фактор – это комплексная мера качества сигнала оптического канала, учитывающая влияние шума, фильтрации и линейных/нелинейных искажений на форму импульса, что невозможно определить только с помощью классических оптических параметров.

В соответствии с рекомендацией МСЭ-Т O.201 "Q-factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels" измерение Q-фактора – признанный метод оценки характеристик оптических каналов (см. также Рекомендации МСЭ-Т G.972 и G.976) [5]. Особенно предпочтителен этот метод при

низких коэффициентах ошибок по битам, так как требует намного меньше времени, чем традиционное измерение BER, когда битовые ошибки необходимо подсчитывать в течение статистически значимого периода. В аппаратуре оптических систем, например DWDM, коэффициент ошибок необходимо измерять в каждом оптическом канале, что занимает много времени. Для сокращения процедуры контроля канала без перерыва передачи информации используется метод на основе оценки Q-фактора, который представляет собой отношение [6]:

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0},$$

где μ_1 и μ_0 – графическая зависимость значения сигнала ("1" и "0") и дисперсии шума σ_1 и σ_0 относительно уровня принятия решения о передаче логической "1" или "0".

Значения μ_1 и μ_0 , σ_1 и σ_0 фиксируются на выходе фотоприемного устройства в виде параметров глаз-диаграммы: Q-фактор может быть определен путем статистической обработки результатов измерения амплитуды и фазы сигнала на электрическом уровне, а именно – непосредственно по глаз-диаграмме.

Чем выше значение Q-фактора, тем лучше качество сигнала в оптическом канале. Обычно Q-фактор оценивается в децибелах:

$$Q \text{ (дБ)} = 10 \lg Q^2 = 20 \lg Q.$$

OSNR и Q-фактор – взаимозависимые параметры, то есть изменение одного оказывает влияние на другой [7]. Связь между OSNR и Q-фактором является логарифмической, поэтому небольшое колебание OSNR может привести к значительному изменению Q-фактора. Обычно Q-фактор увеличивается по мере возрастания OSNR. Однако при высоких значениях OSNR Q-фактор достигает точки насыщения и не улучшается при дальнейшем увеличении OSNR.

Измерить OSNR и Q-фактор в оптическом канале в режиме реального времени можно с использованием специального измерительного оборудования, например, анализатора оптического спектра (OSA – Optical Spectro Analyzer) и измерителя коэффициента битовых ошибок BER.

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ВОСП

Для мониторинга состояния оптических каналов используется частота битовых ошибок BER на его

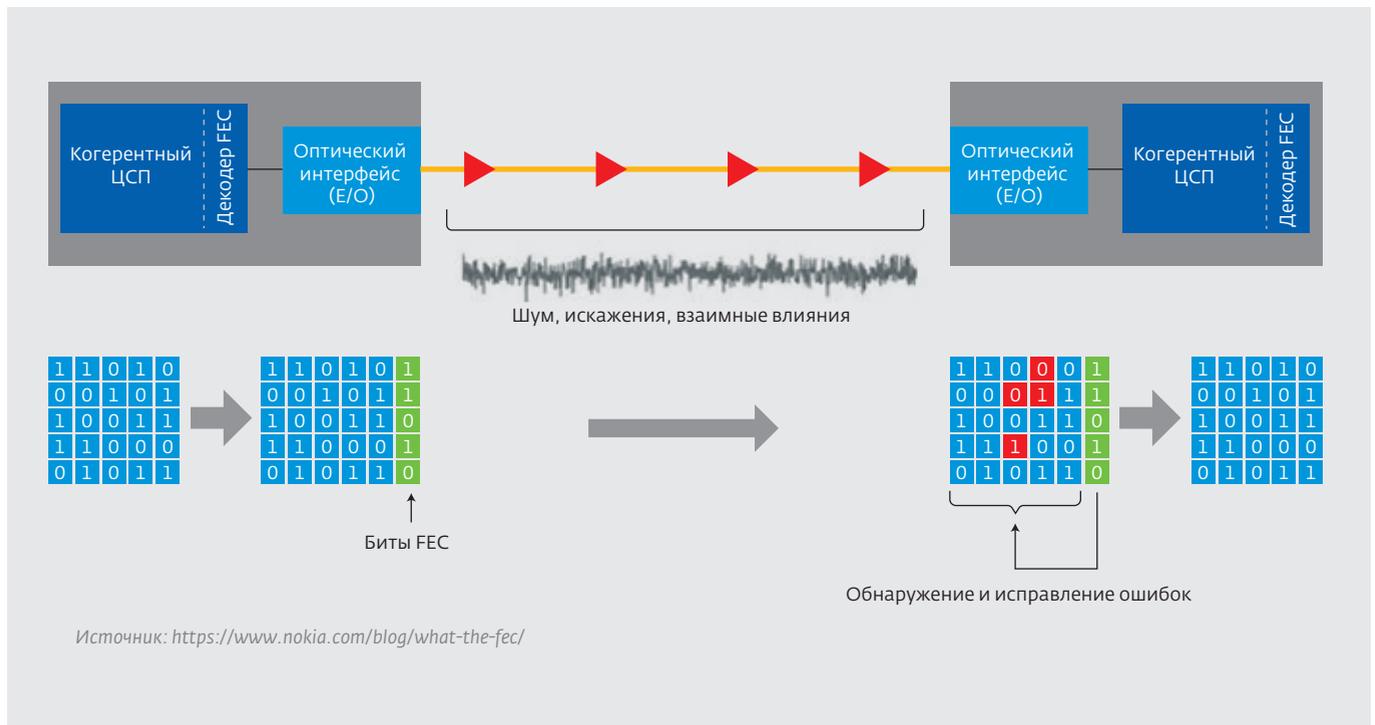


Рис.1. Оптический канал, в котором используются коды с исправлением ошибок FEC

приемной стороне, причем до схемы обнаружения и коррекции ошибок (pre-FEC – pre-Forward Error Correction). В ВОСП основная роль FEC заключается в снижении допустимого значения OSNR в оптическом канале [9, 10].

По значению контроля BER на уровне pre-FEC можно получить предварительные данные о начавшейся деградации параметров канала. Следует отметить, что порог ухудшения сигнала (ber-threshold-signal-degrade) и интервал измерений BER необходимо настраивать:

- порог определяет критерии BER для состояния ухудшения сигнала: если частота появления ошибок в волоконно-оптической линии связи ниже порогового значения схемы, реализующей FEC, то все ошибки исправляются схемой FEC и потери данных не происходит;
- минимальный интервал времени определяет требуемый минимальный объем данных: если для этого объема данных параметр BER превысит пороговое значение, то будет сформирован сигнал тревоги.

Настраивая соответствующий порог и интервал контроля ошибок на уровне pre-FEC, можно предпринимать упреждающие действия еще до того, как будет достигнут предел

возможностей FEC по обнаружению и исправлению ошибок [11].

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОДОВ FEC В ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛАХ ВОСП

Обнаружение ошибок в технике связи – действие, направленное на обеспечение контроля целостности данных при записи/воспроизведении информации или при ее передаче по каналам связи [12]. Исправление (коррекция) ошибок – процедура восстановления информации после чтения ее из устройства хранения или канала связи.

Корректирующая способность определяет, сколько ошибок передачи кода можно гарантированно исправить. Для этого при записи (передаче) в полезные данные добавляют специальным образом структурированную избыточную информацию (контрольное число), а при чтении (приеме) ее используют для обнаружения или исправления ошибок (рис.1).

Естественно, что число ошибок, которое можно исправить, ограничено и зависит от конкретного применяемого кода. Алгоритмы FEC (Forward Error Correction) работают путем формирования дополнительных битов FEC или битов проверки на четность на стороне передачи,

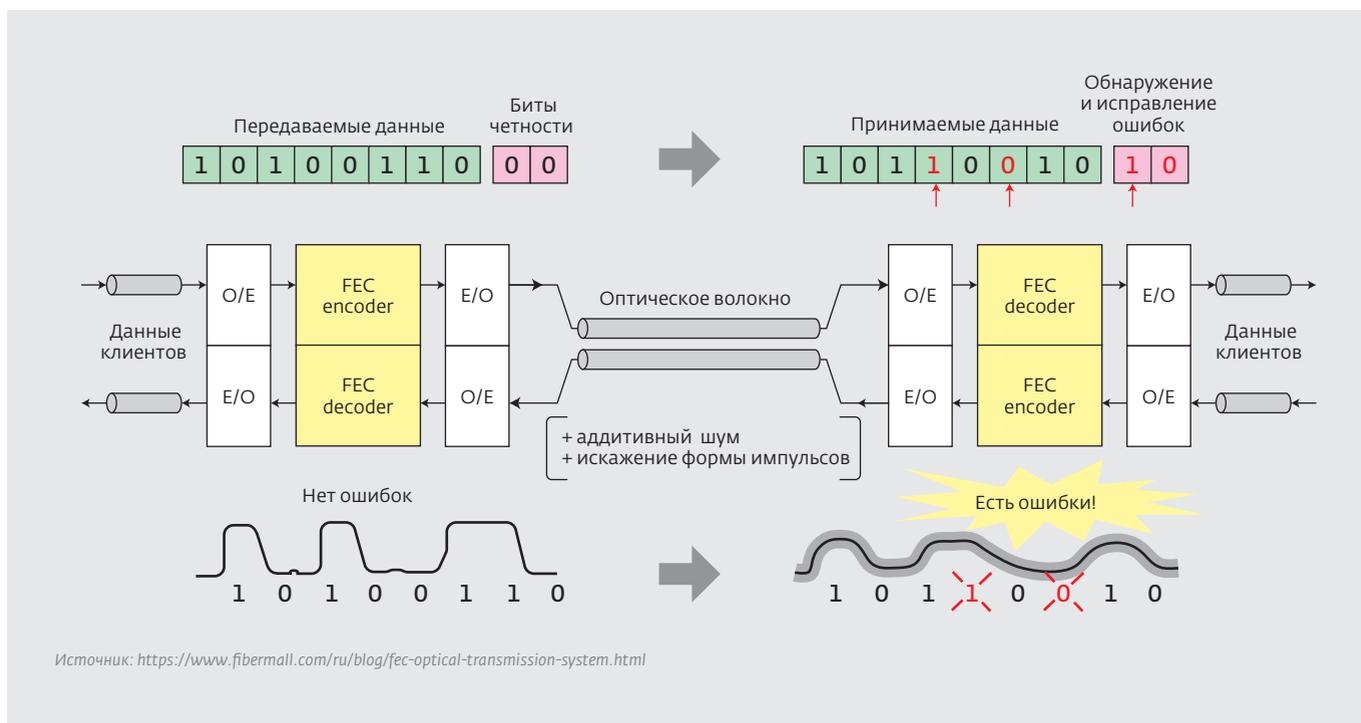


Рис.2. Функции FEC

которые используются для того, чтобы найти и исправить любые битовые ошибки на стороне приема [9].

Методы выявления и исправления ошибок передачи существенно влияют на характеристики передачи данных по оптическим каналам систем OTN/DWDM. Так, в каналах пропускной способностью 100 Гбит/с минимальное значение OSNR должно быть примерно на 10 дБ выше, чем в каналах пропускной способностью 10 Гбит/с. Без определенной коррекции или компенсации значение отношения сигнал/шум (OSNR) для оптического сигнала будет ограничивать передачу данных по каналу пропускной способностью 100 Гбит/с до очень коротких расстояний. Максимальная дальность передачи по стандартному одномодовому оптоволокну (например, G.652) может составить порядка 40 км.

Для поддержания высокого качества (то есть низкой частоты появления ошибок) передачи полезного сигнала по оптическим каналам на большие расстояния в соответствии с рекомендацией МСЭ-Т G.709/Y.1331 "Interfaces for the optical transport network" используются разнообразные коды FEC с обнаружением и исправлением ошибок.

Пример кодирующего устройства с предварительно вычисленными (на стороне передачи)

битами проверки на четность передаваемой двоичной последовательности представлен на рис.2 [13].

Известно два типа технологий FEC [13]:

- внутриполосный FEC, который определяется стандартом МСЭ-Т G.707, позволяет обнаруживать и исправлять ошибки в данных на приемной стороне без увеличения скорости передачи данных или необходимости отправки информации обратно на передающую сторону. Для добавления избыточных байтов таких кодов, как коды Рида-Соломона, BCH и др., используются свободные позиции в служебной части цикла (кадра) SDH [14]. Байты FEC загружаются на позиции части свободных служебных байтов в цикле (кадре) SDH. Чистый выигрыш от кодирования не превышает 3-4 дБ [15];
- внеполосный FEC, определяемый стандартом МСЭ-Т G.975/709. Байты FEC размещаются в служебной части структуры OTUk. Этот тип FEC отличается большой избыточностью кодирования, расширенными возможностями по исправлению ошибок, высокой гибкостью и весомым выигрышем от кодирования – не менее 5-6 дБ. Для системы OTN рекомендацией

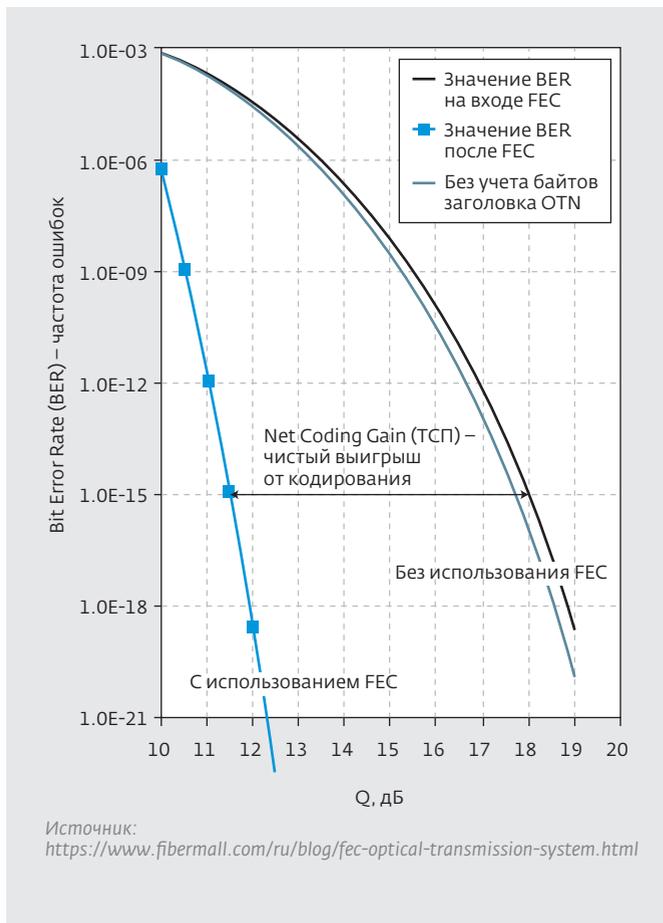


Рис.3. Выигрыш от кодирования для определенного уровня BER с FEC и без FEC

МСЭ-Т G.709 определен FEC Рида-Соломона (RS-FEC). Более подробно эволюция решений с использованием внеполосного FEC представлена во второй части статьи.

Существует три основных критерия эффективности FEC [12]:

1. NCG (Net Coding Gain) – чистый выигрыш от кодирования, то есть улучшение требований к OSNR, обеспечиваемое сигналом с FEC по сравнению с сигналом без FEC (рис.3). Современный алгоритм FEC обычно гарантирует чистый выигрыш от кодирования порядка 10–12 дБ [9, 13].

Рекомендация МСЭ-Т G.709 определяет порядок коррекции ошибок для каналов OTN/DWDM, которая может улучшить отношение сигнал/шум (SNR) до 6,2 дБ. Это означает, что можно принять сигнал с определенной частотой битовых ошибок (BER) и уровнем оптической мощности

на 6,2 дБ меньшей, чем без использования FEC [16]. Такой результат позволяет:

- увеличить максимальную длину участка ВОСП и/или количество участков OTS (Optical Transport Section) ВОСП, что приведет к увеличению дальности связи. При этом хроматическая и поляризационная модовая дисперсии не становятся ограничивающими факторами;
 - увеличить количество каналов (длин волн) в групповом сигнале OTN/DWDM ВОСП за счет уменьшения уровня оптической мощности на канал. При этом учитываются также изменения в нелинейных взаимодействиях из-за снижения мощности на канал;
 - снизить требования к таким параметрам оптического канала, как уровень выходной оптической мощности на передающей стороне, параметры глаз-диаграммы, коэффициент затухания, коэффициент шума и т. п. Удобным и простым графическим методом оценки качества цифрового сигнала на приемной стороне оптического канала является глаз-диаграмма. Она представляет собой результат наложения всех возможных импульсных последовательностей в течение промежутка времени, равного двум тактовым интервалам линейного сигнала [17].
2. Требуемое количество дополнительных байтов для FEC в заголовке цикла OTN. Коэффициент избыточности – это отношение битов FEC к битам передаваемых данных. До определенного практического предела, чем больше служебных битов выделяется для обработки FEC, тем выше NCG и общие характеристики сети. Последние версии высокопроизводительных FEC спроектированы с использованием 15–25% дополнительных служебных байт в заголовке цикла OTN.
 3. Порог работы FEC по частоте ошибок во входном сигнале (Pre-FEC BER threshold). Пороговое значение BER до FEC – это худшая частота входящих ошибок по битам, которые еще исправляются алгоритмом FEC. Преимущество современных FEC в том, что они принимают искаженные входящие сигналы, исправляют ошибки и преобразовывают поток данных с ошибками практически в безошибочный.

ЛИТЕРАТУРА

- OSNR & Q-factor Dependency: Understanding The Impact On Signal Quality And Network Performance. [Электронный ресурс]. URL: <https://mapyourtech.com/does-osnr-and-q-factor-affect-optical-link/> (дата обращения 22.10.2023).
- МСЭ-Т. G.697 (06/04) Optical monitoring for DWDM systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.697/en> (дата обращения 22.10.2023).
- Измерение оптического отношения сигнал/шум в когерентных системах с использованием передачи с поляризационным мультиплексированием. [Электронный ресурс]. URL: <https://skomplekt.com/izmerenie-opticheskogo-otnosheniia-signal-shum-viavi-scorm/> (дата обращения 22.10.2023).
- Helpiks. Q-фактор. [Электронный ресурс]. URL: <https://helpiks.org/5-33832.html> (дата обращения 22.10.2023).
- МСЭ-Т. O.201 (07/03). Q-factor test equipment to estimate the transmission performance of optical channels. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-O.201> (дата обращения 22.10.2023).
- Q-фактор для оценки качества передачи. [Электронный ресурс]. URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/volonno-opticheskie-sistemy-peredachi/8-linejnye-trakty-opticheskikh-sistem-peredachi/8-8-q-faktor-dlya-otsenki-kachestva-peredachi> (дата обращения 22.10.2023).
- OSNR & Q-factor dependency: understanding the impact on signal quality and network performance. [Электронный ресурс]. URL: <https://mapyourtech.com/does-osnr-and-q-factor-affect-optical-link/> (дата обращения 22.10.2023).
- A Tutorial on ITU-T G.709 Optical Transport Networks (OTN). Technology White Paper. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.all-electronics.de/wp-content/uploads/migrated/article-pdf/85811/417-2081250-otn-tutorial-053751.pdf> (дата обращения 22.10.2023).
- Randy Eisenach. What the FEC? (28.10.2022). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nokia.com/blog/what-the-fec/> (дата обращения 22.10.2023).
- FEC in optical communication. A Tutorial Overview on the Evolution of Architectures and the Future Prospects of Outband and Inband FEC for Optical Communications. IEEE Circuits & Devices Magazine. November/December 2006. [Электронный ресурс]. URL: <https://cdn.optiwave.com/wp-content/uploads/2021/06/FEC-in-Optical-Communications.pdf> (дата обращения 22.10.2023).
- Forward Error Correction (FEC) and Bit Error Rate (BER). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/junos/interfaces-ethernet/topics/topic-map/fec-ber-otn-interfaces.html#id-understanding-pre-fec-ber-monitoring-and-ber-thresholds> (дата обращения 22.10.2023).
- Обнаружение и исправление ошибок. [Электронный ресурс]. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/33442#.D0.9A.D0.BE.D0.B4.D1.8B_.D0.A5.D0.B5.D0.BC.D0.BC.D0.B8.D0.BD.D0.B3.D0.B0 (дата обращения 22.10.2023).
- Что такое FEC оптической системы передачи? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fiber-mall.com/ru/blog/fec-optical-transmission-system.htm> (дата обращения 22.10.2023).
- BCH code. [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/BCH_code#:~:text=In%20coding%20theory%2C%20the%20Bose,also%20called%20a%20Galois%20field (дата обращения 22.10.2023).
- In band FEC encoder for SONET/SDH at 2.5 and 10 Gbps. [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/272021669_In_band_FEC_encoder_for_SONETSDH_at_25_and_10_Gbps (дата обращения 22.10.2023).
- Optical Transport Network (OTN) Tutorial. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf> (дата обращения 22.10.2023).
- Анализ методов оценки качества сигнала: глаз-диаграмма, коэффициент битовых ошибок. [Электронный ресурс]. URL: <https://skomplekt.com/tools/377481.html/> (дата обращения 22.10.2023).
- Когерентные CFP 2-ACO / CFP 2-DCO WDM оптические модули (100G/200G) и их применение в системах DWDM. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/articles/449330/> (дата обращения 22.10.2023).
- Lumentum. Superior performance for high-speed coherent transmission. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.lumentum.com/en/optical-communications/products/dwdm-and-coherent-optical-transceivers/coherent-transceivers> (дата обращения 22.10.2023).
- Коган С.С. Сети 5G: эволюция к открытой сетевой инфраструктуре. Часть 1. Основные элементы концепции открытых решений для сетевой инфраструктуры 5G // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2023. № 2. С. 46-54.
- Коган С.С. Сети 5G: эволюция к открытой сетевой инфраструктуре. Часть 2. Стандартизация решений для открытой сетевой инфраструктуры и радиодоступа 5G // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2023. № 3. С. 62-70; № 4. С. 42-46.