ЭВОЛЮЦИЯ РЕШЕНИЙ С ОБНАРУЖЕНИЕМ И ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК в оптических каналах OTN/DWDM

Часть 2. Эволюция поколений и совместимые алгоритмы FEC

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

УДК 621.391.15, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.116.8.52.58

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).

Эволюция поколений FEC

Первое поколение FEC

Один из наиболее распространенных кодов первого поколения FEC – код Рида – Соломона (255, 239). Циклические коды Рида – Соломона позволяют исправлять ошибки в блоках данных, которые являются частным случаем БЧХ-кодов Боуза – Чоудхури – Хоквингема (BCH, Bose – Chaudhuri – Hocquenghem). БЧХ-коды отличаются возможностью их построения с заранее определенными корректирующими свойствами, а именно минимальным кодовым расстоянием.

Поясним, что БЧХ-коды образуют класс циклических кодов с исправлением ошибок, которые строятся с использованием полиномов над конечным полем, также именуемым полем Галуа (Galois field). Конечное поле, или поле Галуа (названное так в честь Эвариста Галуа), содержит конечное число элементов. Как и любое конечное поле, это множество с конкретными операциями умножения, сложения, вычитания и деления, которые удовлетворяют определенным основным правилам. Наиболее распространенные примеры конечных полей – целые числа по модулю p, когда p – простое число.

Частным случаем БЧХ-кодов является код Рида – Соломона, в котором элементами кодового вектора служат не биты, а группы битов (блоки). Код Рида – Соломона (255, 239), широко известный как GFEC (Generic Forward Error Correction), считается одним из первых алгоритмов FEC, примененных в волоконно-оптических системах передачи.

Он был принят как часть спецификаций МСЭ-Т G.709 и включен в стандартную структуру кадра OTN (Optical Transport Networks). После выхода стандарта G.709 OTN код GFEC стал широко применяться для оптических интерфейсов 10G. При использовании GFEC для каждых 239 байтов данных формируется 16 проверочных байтов данных FEC. При этом GFEC задействует для битов FEC примерно 6–7% суммарного объема передаваемых по оптическому каналу данных и обеспечивает значение NCG, равное 6,2 дБ [9]. Коды Рида – Соломона добавляют немного, то есть всего 7%, проверочных байтов и около 6 дБ дополнительного запаса OSNR. Но даже этот результат позволил увеличить расстояние между регенераторами оптических каналов, то есть узлами с OEO (Optical-Electrical-Optical) преобразованием, в четыре раза.

Однако по современным стандартам эффективность GFEC считается низкой или умеренной. GFEC показал свою эффективность для сигналов 10G, но при переходе к каналам 100G и B100G (Beyond 100G) возникла потребность в более эффективных алгоритмах FEC.

Второе поколение FEC

Некоторые производители предлагали, например, для оптических интерфейсов 10G и 40G использовать, в дополнение к коду Рида – Соломона, более сложные схемы кодирования второго поколения FEC. Алгоритмы EFEC (Enhanced Forward Error Correction), называемые "ультра" FEC или "усиленный" FEC, также задействуют не более 7% объема передаваемого кадра. Однако в них заложены более сложные алгоритмы кодирования/декодирования, которые обеспечивают больший выигрыш по OSNR, чем код Рида – Соломона, то есть позволяют получить дополнительно от 2 до 3 дБ. Для оптических каналов большой протяженности с пропускной способностью 100G и выше в МСЭ-Т рекомендован SC FEC (StairCase FEC). В этом "лестничном" коде сочетаются идеи рекурсивного сверточного и блочного кодирования. При использовании этого кода цикл (кадр) OTU (Optical Transport Unit) линейного сигнала OTN получил наименование OTU-4-SC (МСЭ-Т G.709.2/Y.1331.2 "OTU4 long-reach interface").

Применение OTN структуры OTU-4-SC (HD-SC FEC, или просто SC FEC) для каналов 100G подразумевает размер заголовка оптического транспортного блока OTU до 7% общего объема передаваемых по оптическому каналу данных за счет включения в состав заголовка цикла дополнительных байтов аппаратного (HD) кода с исправлением ошибок SC FEC. Результирующее кодовое усиление для SC FEC составляет порядка 8,35 дБ для канала с аддитивным белым гауссовым шумом. Поскольку кодовое усиление соответствует разнице между значениями отношения сигнал/шум на приемной стороне в системе без FEC и с FEC, при использовании SC FEC можно допустить более низкое отношение сигнал/шум в оптическом канале при той же дальности связи.

Рассматривались следующие варианты аппаратной реализации FEC второго поколения:

- конкатенированные (каскадные, объединенные) FEC (Concatenated FECs). CFEC используют примерно 15% служебных данных и обеспечивают NCG ~10,8 дБ;
- блочные турбокоды (Block turbo codes) FEC – поддерживают NCG приблизительно на уровне ~11 дБ;
- проприетарные (частные) реализации FEC, основанные на кодах проверки четности с низкой плотностью LDPC (Low Density Parity Check), – обеспечивают NCG в диапазоне от 11,5 до 12 дБ.

Третье поколение FEC

По мере повышения скорости в канале передачи данных с 10 до 100G и B100G требование к OSNR увеличилось на 10 дБ. Без определенного вида компенсации или коррекции протяженность трасс с канальной скоростью 100G была бы весьма ограниченной и неэкономичной. По этой и другим причинам, помимо первого, аппаратного (HD – Hard Decision) поколения FEC типа Рида – Соломона FEC, второго, аппаратного поколения FEC типа EFEC, существенно улучшивших параметры оптических каналов 10G и 40G, и типа SC-FEC, который позволил значительно улучшить параметры оптических каналов 100G (OTU4), было разработано более производительное, программно-определяемое решение SD (Software Decision) FEC третьего поколения. Это решение обеспечило увеличенную дальность и улучшенные характеристики высокоскоростных каналов передачи данных 100G и B100G.

Алгоритмы HD-FEC первого и второго поколений были использованы для снижения BER и увеличения ретрансляционного участка, то есть расстояния между узлами с OEO-преобразованием.

В SD-FEC реализован алгоритм кодирования третьего поколения, который обеспечивает передачу данных по оптическим каналам 100G и B100G на большие расстояния и с увеличенными ретрансляционными участками. FEC-решение третьего поколения основано на еще более мощных алгоритмах итеративного кодирования.

В аппаратном HD-FEC блок декодирования использует аппаратное решение на основе принятого (входного) сигнала и определяет один бит информации как "1" или "0" как результат сравнения принятого сигнала с пороговым значением. Параметры принятого сигнала выше установленного порога определяются "1", а значения ниже – как "0".

В программно-определяемом SD FEC для обеспечения более детальной и точной индикации входящего сигнала используются дополнительные биты. Иными словами, декодер не только определяет на основе порогового значения, является ли входящий сигнал "1" или "0", но и обеспечивает фактор надежности "принятия решения". Программные декодеры используют дополнительные биты или биты "достоверности", чтобы указать, насколько выше или ниже полученный бит порогового значения. Из-за вероятностного характера систем связи биты, которые иногда находятся очень близко к порогу (чуть выше или ниже), могут быть неверно определены и истолкованы. Программные декодеры, особенно в сочетании с итеративным декодированием, обеспечивают точный прием тех битов, которые находятся очень близко к пороговому значению.

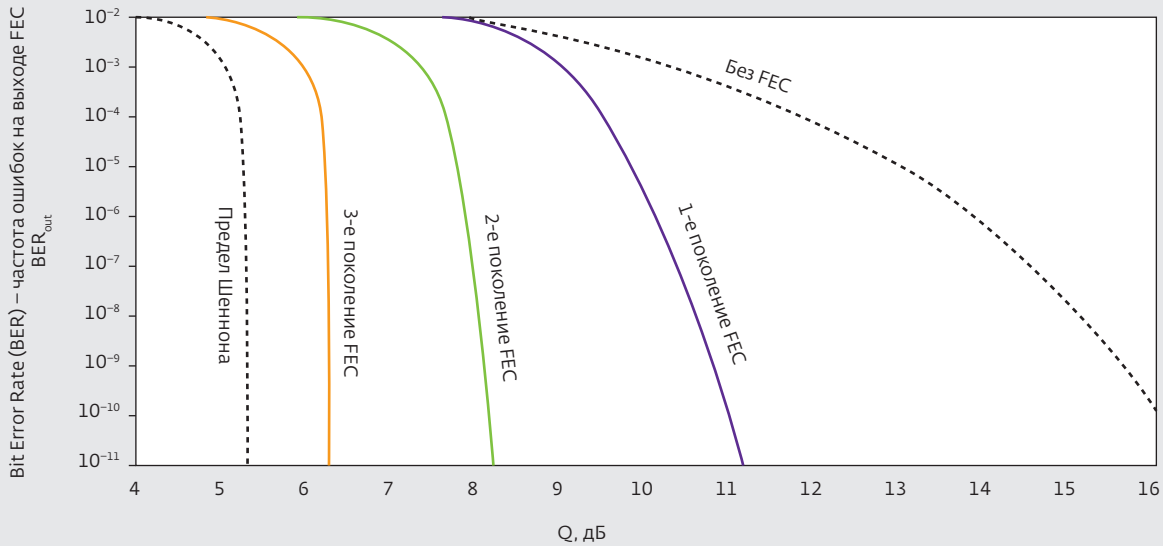
При использовании SD FEC размер заголовка (количество байтов заголовка) увеличивается до 20% вместо упомянутых выше 7% (то есть более чем в два раза превосходит объем байтов FEC первого и второго поколений), но при этом достигается кодовое усиление до 9,5–10 дБ (то есть дополнительное повышение кодового усиления на 1–2 дБ), что соответствует увеличению дальности связи на 20–40% по сравнению с HD FEC. На существующих протяженных магистральных оптических транспортных сетях с дальностью связи по оптическим каналам 100G порядка 3000 км в основном используют формат модуляции DP (Dual Polarization) – QPSK и SD FEC.

Сравнение эффективности FEC разных поколений [9] представлено на рис.4.

Совместимые алгоритмы FEC

Существует несколько FEC-алгоритмов кодирования, которые различаются по своим характеристикам и уровню сложности при реализации. До недавнего времени производители оборудования для оптических транспортных сетей предлагали и реализовывали собственные алгоритмы FEC. Хотя у каждого производителя были свои "секретные" варианты FEC, почти все отраслевые FEC работают с использованием небольшого числа основных кодов FEC. В результате характеристики FEC, как правило, очень схожи между собой, особенно при сравнении характеристик FEC для одного и того же поколения когерентных цифровых сигнальных процессоров ЦСП/DSP.

Чтобы обеспечить совместимость оборудования различных производителей, прежде всего



Источник https://www.nokia.com/blog/what-the-fec/

Рис.4. Сравнение эффективности FEC разных поколений

Таблица 1. Параметры кодов CFEC/CFEC+/oFEC/LDPC

Тип FEC	Где используется	Вид кода FEC	NCG (дБ)	OH (%)	SOFT (SD)	Итерации декодирования	Порог частоты ошибок до FEC	Примечание
CFEC	400ZR	Concatenated SC-FEC/ SD-Hamming	10,8	14,8	Yes	1	1.2E-2	Cascaded hard decision staircase FEC & soft decision Hamming FEC
CFEC+		Concatenated SC-FEC/ SD-Hamming	~11.2* *estirnate	14,8	Yes	3	1.2E-2	Same as CFEC, with multiple soft decoder iterations
oFEC	OpenZR+ OpenROADM Nokia C2DC040	Block Turbo Code (BCH)		15,3	Yes	1 to 3	2.0E-2	oFEC gaining populanty due to industry MSA standardization & relatively strong NCG
LDPC	Vendor high-perf transponders	LDPC		25	Yes	3	3.3E-2	

OH – байты заголовка OTN
SD – Soft Decision (программно-определяемый FEC)

Источник: https://www.nokia.com/blog/what-the-fec/

сменных линейных модулей-трансиверов (приемо-передатчиков), с появлением интерфейсов 400ZR, OpenZR+ и OpenROADM отрасль постепенно переходит на следующие совместимые алгоритмы FEC:

- Конкатенированные (каскадные, объединенные) FEC (Concatenated FEC). Конкатенированные FEC, также известные как каскадные FEC (CFEC), объединяют внутренний и внешний (inner and outer) коды FEC, обеспечивая значительно улучшенную производительность по сравнению с исходным GFEC (код Рида – Соломона 255, 239). Каскадный FEC (CFEC) сочетает внешний "лестничный" (staircase) код аппаратного (Hard Decision) HD-FEC (SC-FEC) и внутренний код Хэмминга программного (Soft Decision) SD-FEC. Коды Хемминга – простейшие линейные коды, способные исправлять одиночные ошибки. Использование CFEC предусмотрено в рамках Соглашения о реализации OIF 400ZR для применения в когерентных модулях 400ZR. В этом случае в заголовке цикла OTN используется примерно 15% дополнительных служебных байтов, за счет чего обеспечивается выигрыш NCG порядка 10,8 дБ. Помимо 400ZR, каскадные FEC также широко использовались в решениях 100G первого поколения.
- Блочные турбокоды (Block turbo codes). Алгоритм FEC "Block Turbo Code" обеспечивает более высокую производительность. Он был принят к использованию Соглашениями OpenZR + & Open ROADM (MSA) и известен как "oFEC" (Open FEC). Открытый FEC обеспечивает примерно 11 дБ NCG.
- Коды LDPC (Low Density Parity Check). Код LDPC с малой плотностью проверок на четность – частный случай блочного линейного кода с проверкой на четность. Особенностью этой реализации является малая плотность значимых элементов проверочной матрицы, за счет чего достигается относительная простота реализации средств кодирования. Хотя базовая математика для кодов LDPC была разработана в 1960-е годы, только в 1990-е эти алгоритмы начали вводить в современные системы связи. И лишь в 2015 году коды LDPC стали широко внедрять в оптические транспондеры в коммерческих целях. Коды FEC на основе LDPC обычно обеспечивают выигрыш порядка 11,5–12 дБ NCG.

В табл.1 представлены параметры перечисленных выше кодов FEC, включая pre-FEC BER Threshold [9].

Линейные сменные оптические модули-трансиверы (приемо-передатчики) с функциональностью FEC

Первые сообщения о появлении сменных оптических когерентных CFP-модулей (coherent CFP

optical pluggable modules) появились примерно пять-шесть лет назад. В настоящее время эти модули широко используются в оборудовании транспортных сетей. Исторически первым для оптических DWDM 100G стал сменный модуль в конструктиве (форм-факторе) CFP. Примером служит модуль компании Acacia, построенный по самой передовой на тот момент технологии когерентного детектирования с использованием модуляции DP-QPSK.

Такой сменный модуль заменял классический встроенный линейный интерфейс DWDM на транспондере, работающем в С-полосе длин волн (C-band) оптического излучения.

Модули CFP2 значительно больше привычных сменных модулей QSFP28, но именно в таком форм-факторе реализовано решение CFP2 – ACO (Analog Coherent Optics) / DCO (Digital Coherent Optics). Когерентные оптические модули-трансиверы ACO/DCO различаются расположением цифрового сигнального процессора ЦСП (DSP, Digital Signal Porcessor), выполняющего, в том числе, функции FEC [18]:

- CFP2-ACO – на модуле находится только оптическая часть. Вся электроника размещена на плате (card; board) оборудования, куда этот модуль вставляется. На тот момент не было технологий, позволявших разместить ЦСП внутри оптического модуля. По сути, это модули первого поколения;
- CFP2-DCO – в данном случае ЦСП расположен в самом оптическом модуле. В ЦСП реализуется, как правило, и функциональность FEC. Это законченное "коробочное" решение – пример модулей второго поколения.

В этих решениях поддерживается несколько форматов модуляции для оптических каналов 100G/200G, а именно DP-QPSK (100G), DP-8QAM/16QAM (200G). Внешне такие модули совершено одинаковые по конструктивному исполнению и размерам, но различаются начинкой, а также объемом энергопотребления и тепловыделения. Например, у модуля DCO энергопотребление в два раза выше, чем у ACO. В подавляющем большинстве случаев совместная работа модулей DCO с ЦСП возможна, если эти устройства одного и того же производителя.

Для сетей большой (LH, longhaul) и сверхбольшой (ULH, Ultra long haul) протяженности используются, как правило, не сменные, а встроенные в оборудование линейные интерфейсы, которые позволяют обеспечить большую дальность, лучший OSNR и более высокие уровни модуляции QAM. Поэтому основной областью применения сменных (pluggable) оптических когерентных модулей являются сети взаимодействия ЦОДов, а также городские и зоновые (региональные), то есть Metro/Regional, сети.

Примером служит продукт компании Lumentum – сменный оптический когерентный линейный модуль-трансивер CFP2-DCO размером 106×41,5×12,4 мм, ориентированный для использования на сетях взаимодействия ЦОД (DCi), а также операторских городских и зоновых (региональных) сетях [19]. Модуль представляет собой цифровой когерентный оптический приемопередатчик в конструктиве (форм-факторе) CFP2 с поддержкой форматов модуляции DP-QPSK 100 Гбит/с и DP-8/16QAM 200 Гбит/с. В состав этого модуля входят:

- СБИС ЦСП с функциональностью SC (staircase) FEC / SD FEC с низкой задержкой и дополнительными байтами заголовка в объеме 15%. В модуле поддерживается мониторинг цикла (кадров) OTU4/ODU G.709, включающего байты FEC, имеется встроенный генератор/анализатор псевдослучайной последовательности ПСП (PRBS – PseudoRandom Binary Sequence) для линейного и клиентского интерфейсов. Кроме того, предусмотрена возможность организации шлейфов по входному и выходному сигналам данных;
- PIC (Photonic Integrated Circuit, фотонная интегральная схема) Lumentum на фосфиде индия (InP), включающая:
  - перестраиваемый лазер Lumentum с узкой полосой частот излучения и возможностью перестройки длины волны в соответствии с сеткой частот (длин волн) МСЭ,
  - модулятор Lumentum InP Маха-Цендера (MZ),
  - когерентный приемник Lumentum (μICR) с электронно-управляемым аттенюатором мVOA.

На международной европейской выставке по волоконно-оптическим технологиям ECOC 2023 (2–4 октября 2023 года, г. Глазго, Шотландия) компании Marvell, Coherent & Lumentum продемонстрировали сменные линейные компактные когерентные модули-трансиверы DCO нового поколения для открытых (дезагрегированных) оптических транспортных сетей [20, 21] с каналами пропускной способностью 800 Гбит/с. По данным упомянутых компаний, в этом решении в компактном конструктивном исполнении QSFP-DD и OSFP-DD:

- использованы фотонные интегральные схемы PIC (Photonic Integrated Circuit) IC-TROSA компании Coherent в сочетании с ЦСП Orion компании Marvell,
- реализованы символьная скорость 140 ГБод и уровень мощности выходного оптического сигнала, равный 0 дБм,
- достигнут высокий уровень интеграции таких оптических элементов, как лазер с узкой полосой излучения (narrow line laser), квадратурный модулятор IQM сигнала QAM, оптический приемник, средства усиления и фильтрации оптического сигнала, необходимая электроника, с размещением всех указанных выше составляющих в герметично закрытом позолоченном корпусе с цифровым управлением,
- достигнута лучшая в отрасли энергоэффективность.

Заключение

С введением когерентных интерфейсов 100G в 2010 году производители оборудования для оптических транспортных сетей начали внедрять значительно более мощные и усовершенствованные алгоритмы прямой коррекции ошибок (FEC) в когерентные ЦСП и транспондеры. Кроме того, для мониторинга состояния оптического канала используется оценка частоты битовых ошибок BER, полученная до схемы обнаружения и коррекции ошибок на его приемной стороне (pre-FEC).

В результате транспондеры со встроенными или сменными линейными оптическими когерентными модулями-трансиверами DCO для каналов пропускной способностью от 200G до 800G работают в обычных и открытых (дезагрегированных) ВОСП близко к теоретическому пределу Клода Шеннона. Современные алгоритмы FEC обеспечивают прирост эффективности до 10–12 дБ, что, безусловно, является самым значительным улучшением характеристик оптических транспортных сетей по дальности передачи без промежуточного OEO-преобразования.

Литература

1. 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).

2. 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).
3. 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).
4. Helpiks. Q-фактор. [Электронный ресурс]. URL: https://helpiks.org/5-33832.html (дата обращения 22.10.2023).
5. 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).
6. Q-фактор для оценки качества передачи. [Электронный ресурс]. URL: https://siblec.ru/telekommunikatsii/volokonno-opticheskie-sistemy-peredachi/8-linejnye-trakty-opticheskikh-sistem-peredachi/8-8-q-faktor-dlya-otsenki-kachestva-peredachi (дата обращения 22.10.2023).
7. 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).
8. 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).
9. Randy Eisenach. What the FEC? (28.10.2022). [Электронный ресурс]. URL: https://www.nokia.com/blog/what-the-fec/ (дата обращения 22.10.2023).
10. 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).
11. 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).
12. 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).
13. Что такое FEC оптической системы передачи? [Электронный ресурс]. URL: https://www.fibermall.com/ru/blog/fec-optical-transmission-system.htm (дата обращения 22.10.2023).
14. 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).
15. 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).
16. Optical Transport Network (OTN) Tutorial. [Электронный ресурс]. URL: https://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf (дата обращения 22.10.2023).
17. Анализ методов оценки качества сигнала: глаз-диаграмма, коэффициент битовых ошибок. [Электронный ресурс]. URL: https://skomplekt.com/tools/377481.html/ (дата обращения 22.10.2023).
18. Когерентные CFP2-ACO / CFP2-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).
19. 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).
20. **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.
21. **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.