

ОЦЕНКА OSNR В КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Е. Г. Богданова^{1*}

¹ СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

* Адрес для переписки: Evgenia15V@gmail.com

Аннотация

Постоянно развивающиеся технологии передачи данных требуют качественных изменений в измерительном оборудовании, в том числе, входящем в состав систем мониторинга. **Предмет исследования.** Предметом обсуждения в данной статье является измерение оптического отношения сигнал – шум (OSNR – Optical signal-to-noise ratio). **Метод.** Будут рассмотрены и проанализированы существующие методы оценки отношения сигнал-шум, описаны математические модели шумовой составляющей, а также высказано предположение о возможности получения OSNR референсным методом. **Практическая значимость.** Сейчас OSNR лишь косвенно вычисляется по коэффициенту ошибок. Непосредственный мониторинг OSNR реализуется только с перерывом связи. Отсутствие универсального алгоритма определяет практическую необходимость разработки, так как заказчик систем связи требует оценивать именно этот параметр при приемо-сдаточных испытаниях.

Ключевые слова

DWDM, OSNR, когерентные системы, шумы спонтанного усиления, нелинейные эффекты.

Информация о статье

УДК 621.39

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 21.04.17, принята к печати 02.06.17.

Ссылка для цитирования: Богданова Е. Г. Оценка OSNR в когерентных системах связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 2. С. 25–33.

OSNR EVALUATION IN COHERENT NETWORKS

E. Bogdanova^{1*}

¹ SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

* Corresponding author: Evgenia15V@gmail.com

Abstract—The technology development of data transmission demands a qualitative revolution in measurement devices, especially in monitoring systems. **Research subject.** The issue of the article is Optical

signal – to – noise measurement (OSNR). **Method.** The existing methods of OSNR and noise evaluation are described. The idea of reference OSNR measurement is proposed. **Practical relevance.** Actually OSNR can be measured indirectly or directly with transmission interruption. The absence of universal algorithm determines the practical development necessity, as customer asks to evaluate OSNR during the acceptance test.

Keywords—DWDM, OSNR, coherent systems, ASE, nonlinear effects.

Article info

Article in Russian.

Received 21.04.17, accepted 02.06.17.

For citation: Bogdanova E.: OSNR Evaluation in Coherent Networks // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 2. pp. 25–33 (in Russian).

Об OSNR и существующих методах оценки

В соответствии с дополнением 39 к рекомендациям G-серии¹ OSNR в канале определяется следующим образом:

$$OSNR = 10 * \lg \left(\frac{P_i}{N_i} \right) + 10 * \lg \left(\frac{B_m}{B_r} \right). \quad (1)$$

Здесь P_i – интегральная мощность, измеренная спектроанализатором в полосе канала, N_i – интегральная мощность шума в полосе канала, B_m – полоса, занимаемая измеряемым каналом, B_r – относительная полоса, в которой рассчитывается шум ASE. Все измерительные приборы имеют разную разрешающую способность, поэтому рекомендуется нормировать шум, приняв $B_m = 0,1$ нм (12,5 ГГц).

Рекомендации и требования к измерениям отражаются в стандарте G.697 Международного союза электросвязи (ITU – *International Telecommunication Union*)².

Метод интерполяции точек (ИЕС)

Часто производители оптических анализаторов спектра используют акроним ИЕС для обозначения наиболее распространенного и исторически первого алгоритма оценки шума и последующего вычисления OSNR. Интегральная мощность шума N_i определяется интерполяцией измерений в равноудаленных от центральной частоты ν_i точках – в межканальных интервалах. Мощность сигнала, P_i , находят вычитанием из измеренной полной интегральной мощности величины N_i (рис. 1). Полученные величины подставляются в формулу (1) с учетом полосы канала B_r .

¹ Supplement 39 to ITU-T G-series Recommendations (2006). Optical System Design and Engineering Considerations.

² Recommendation ITU-T G.697 (2016). Optical Monitoring for Dense Wavelength Division Multiplexing Systems.

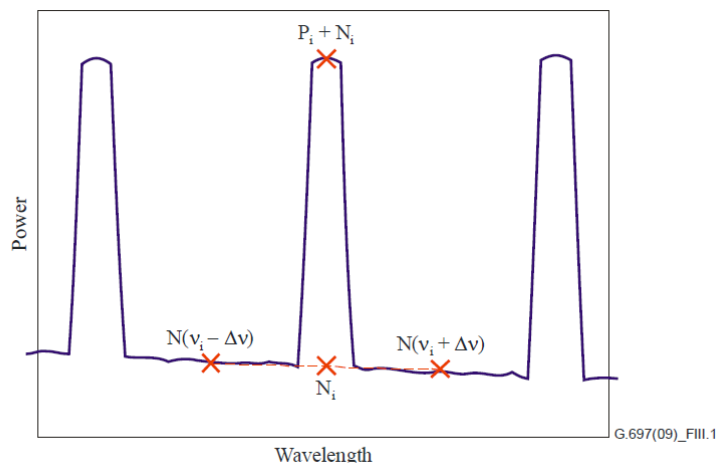


Рис. 1. Определение шума в канале методом интерполяции точек (ITU-T, G.697)

Существенным ограничением метода является невозможность определения шума в системах с сигналами, скорости которых сопоставимы с полосой занимаемого канала. На рис. 2 представлен оптический спектр сигнала, битовая скорость которого 128 Гбит/с (с учетом FEC-заголовков). Информация модулирует фазу излучения несущего лазера в двух поляризациях, формируя оптический сигнал в формате DP-QPSK (*Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying*) с бодовой скоростью 32 Гбит/с. Экспериментально определено, что ширина спектра по уровню -20 дБ от пика составляет 47 ГГц для данного передатчика. Пусть межканальное расстояние в системе – 50 ГГц. Тогда измерения в середине межканального интервала дадут значения не только шума, но и мощности от наложения боковых лепестков – «шум» окажется переоценен.

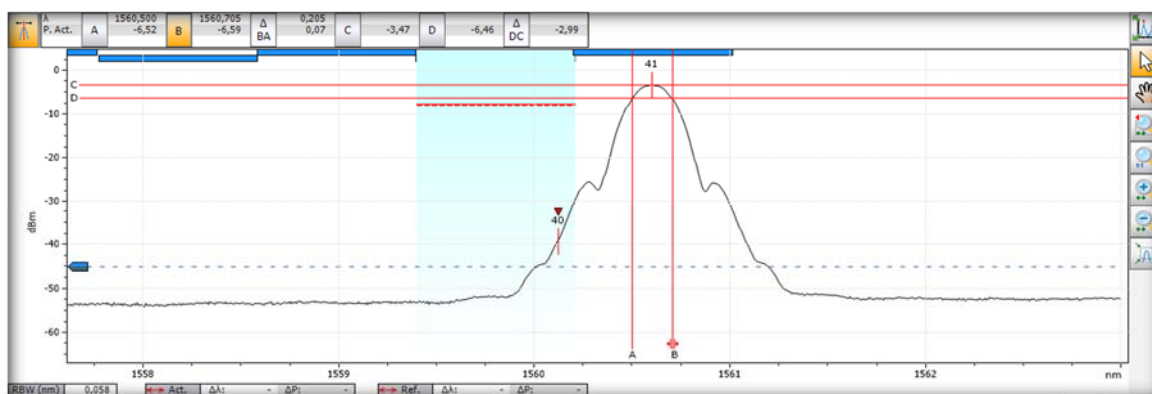


Рис. 2. Спектр информационного сигнала с форматом модуляции DP-QPSK и битовой скоростью 128 Гбит/с

Второе ограничение – невозможность использования IEC-метода при наличии в системе устройств, изменяющих форму спектра. В линиях с устройствами для ввода-вывода каналов ROADМ, реализованных на основе оптических фильтров, шум между каналами окажется подавленным. Интерполяция в таком случае даст меньшее значение N_i в измеряемом канале, фактический накопленный шум не будет корректно оценен. Полученный в итоге OSNR оказывается завышенным (рис. 3).

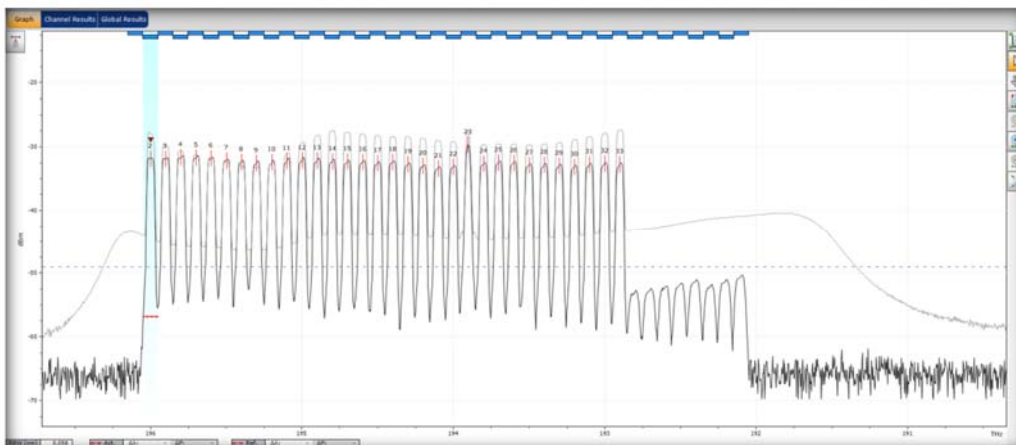


Рис. 3. Спектры группового сигнала до ROADM (серая кривая) и после ROADM (черная кривая). В ROADM групповой сигнал прошел через полосовые оптические фильтры, а, значит, шумы в межканальных интервалах подавлены. Разница между уровнями шума в середине межканальных интервалов для двух точек измерения превышает 10 дБ

Фактически IEC-метод дает лишь оценку шума в канале, но не прямое измерение. Этот факт определяет его применимость только для систем с узкополосными сигналами, работающих в линейном режиме, где для получения OSNR достаточно определить накопленные шумы спонтанного усиления (ASE – *Amplifier Spontaneous Emission*). Шумы же нелинейного происхождения меняют спектр информационных сигналов, а, следовательно, должны быть определены непосредственно в полосе измеряемого канала.

Метод определения шума внутри полосы (In-Band)

В отличие от предыдущего метода, определяющего шум в межканальном интервале, In-Band – алгоритм предлагает измерение непосредственно в полосе (рис. 4). В первом приближении информационный сигнал поляризован в одной плоскости, а ASE-шум имеет случайную поляризацию. Контроллер поляризации по уровню максимальной мощности определит состояние поляризации сигнала, а специальный сплиттер разделит излучение на две ортогональные составляющие, причем информационный сигнал попадет только в одно выходное плечо, а шум разделится пополам. Из полученных значений сигнала с шумом в одном плече и только шума в другом плече поляризационного сплиттера после электронной обработки будет найден интересующий нас OSNR.

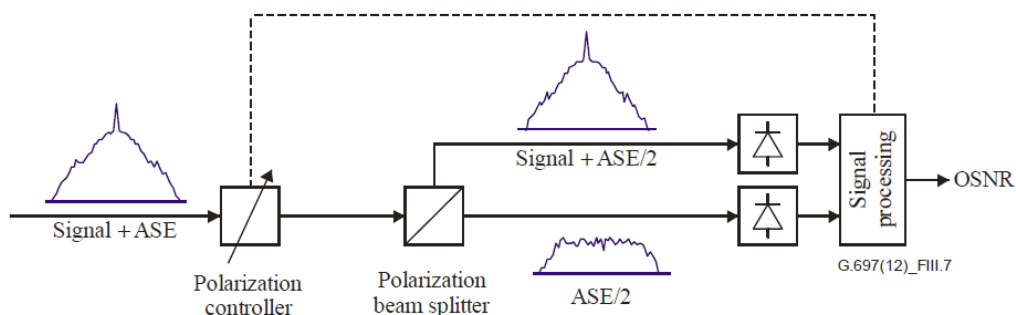


Рис. 4. Измерение OSNR in-band – методом

Метод In-Band, как и IEC, имеет ряд ограничений:

1) Если состояние поляризации сигнала меняется очень быстро, или сигнал становится деполаризованным по мере распространения, оценить полезную составляющую оказывается сложно.

2) При наличии перекрестных помех между каналами, в зависимости от состояния поляризации, эти помехи могут стать как частью измеренного шума, так и частью полезного сигнала.

3) Поляризационно-зависимые потери (PDL – *Polarization-dependent loss*) приводят к некорректной оценке OSNR, так как шум на выходах поляризационного сплиттера может оказаться не в равных соотношениях.

4) Главная проблема in-band метода состоит в невозможности измерить OSNR для поляризационно-мультиплексированных сигналов, широко используемых в высокоскоростных когерентных системах. В частности, для сигнала в формате модуляции DP-QPSK (рис. 2) информация содержится в обеих поляризациях, что делает невозможным использование поляризационного сплиттера для отделения информационной части от шума.

Метод отключения канала (On-Off – метод)

Все предложенные выше методы измерения шума и оценки OSNR на основе полученных данных фактически оказываются неприменимыми для когерентных поляризационно-мультиплексированных сигналов. Тем не менее, оценить накопление шумов при отладке системы связи – насущная практическая задача. Часто выходом является отключение одного из каналов в используемом диапазоне. Так можно определить уровень внутриполосного ASE-шума, полагая с достаточной степенью точности, что отключение не изменит режим работы усилителей при условии многоканальной передачи, и OSNR будет правильно рассчитан.

Рассмотрим измерение OSNR в канале on-off методом (рис. 5). Для примера возьмем физическое моделирование протяженной DWDM-системы петлевым методом, подробно описанное в [1], где встала необходимость оценить накопленный шум при наличии в линии выравнивающих фильтров. Единственным способом это сделать оказалось измерение шума путем отключения интересующего канала.

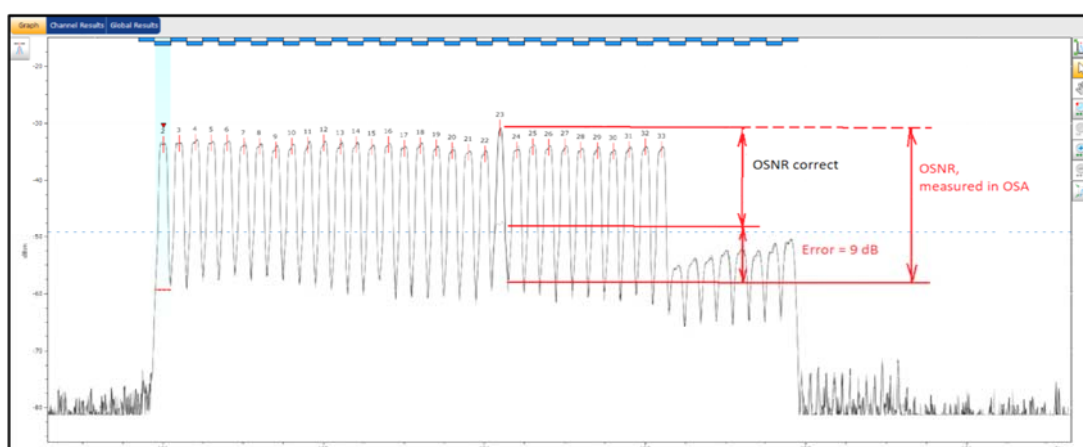


Рис. 5. Измерения спектра группового сигнала для определения OSNR методом отключения каналов при наличии в линии фильтрующих устройств. Разница между IEC и In-Band измерением

Задача эксперимента – оценить OSNR в 23 канале на выходе 1 000 км. Групповой сигнал накопил шумы ASE от 10 EDFA-усилителей (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), расположенных через каждые 100 км волокна. Информация передается с помощью DP-QPSK формата модуляции со скоростью 128 Гбит/с. Помимо того, что сигнал широкополосный, в линии присутствует выравнивающее устройство, пропускающее каждый канал через полосовой фильтр, исключая шум между каналами. Верхняя черная кривая соответствует групповому спектру с включенным измеряемым каналом, после чего информационный сигнал отключается для повторного измерения (серая кривая). IEC метод, встроенный в ПО большинства спектроанализаторов, определит шум на уровне –58 дБ, что на 9 дБ ниже фактического, полученного непосредственно в полосе канала в отсутствие там информации. Правильно оцененный OSNR для данной системы составляет 21 дБ, что подтверждается и теоретическим расчетом.

Очевидно, что метод не может быть использован в условиях живого трафика, где даже секундный перерыв связи чреват огромными потерями для оператора. Использовать же один «служебный» канал из частотного плана для постоянного мониторинга оказывается невозможным из-за неравномерного распределения шумов в диапазоне по причине неидеальности частотной характеристики усилителей или неравных нелинейных воздействий в разных областях спектра.

Существуют и нестандартные решения. Постоянно развивающиеся технологии цифровой обработки сигналов наряду с использованием DSP (*Digital Signal Processor*) в когерентных приемниках предлагают измерение параметров принятого электрического сигнала по каждой из четырех компонент для последующей оценки OSNR. Если процедуры измерения хроматической дисперсии (CD – *Chromatic Dispersion*) и поляризационно-модовой дисперсии (PMD – *Polarization Mode Dispersion*) хорошо отлажены, то непосредственно измерить перекрестные помехи, оценить шумы в условиях наличия фильтров в линии и действия нелинейностей оказывается проблематичным. Встречается большое число статей, устанавливающих связь между электрическим SNR и оптическим OSNR. Тем не менее все эти методы основаны не на измерении шумов, а являются лишь косвенной оценкой.

Подходы к оценке накопленных в линии шумов

Прежде чем подходить к измерению OSNR необходимо понять природу оптического шума в линии и характер его происхождения.

Основной вклад в OSNR на выходе линейного тракта вносят шумы спонтанного усиления EDFA, ASE-шумы, которые линейно накапливаются по мере прохождения групповым сигналом усилительных участков. Эту составляющую мы будем обозначать как $N_{ASE}(f)$. Отметим еще раз, что из-за неидеальности частотных характеристик усилителя шум накапливается неравномерно во всем частотном диапазоне.

С усложнением систем связи: увеличением числа каналов, влекущим уменьшение межканального расстояния и увеличение мощности, вводимой в волокно, оценивать только вклад линейных шумов ASE оказалось недостаточным. Нешумящее по своей природе волокно превратилось в источник нелинейного шума

$N_{NLI}(f)$ при превышении порога нелинейности. Фактически речь идет о появлении новых спектральных составляющих на комбинационных частотах информационного сигнала с неравномерным распределением по частотному диапазону. Этот порог разный для оптических волокон различных типов. В частности, для волокна стандарта G.652 ITU-T пороговое значение мощности в канале, при превышении которого начинают проявляться нелинейные эффекты составляет 0 дБм [4].

Автор на данном этапе решает задачу измерения OSNR в высокоскоростных когерентных системах связи. Шумы когерентного приёмника при этом учитываться не будут, так как их доля незначительна по сравнению с долей шумов, накопленных в ходе распространения по линии.

В условиях, когда межканальное расстояние мало и сопоставимо со скоростью передачи, необходимо учитывать перекрестные помехи и межсимвольную интерференцию (N_{XI}). Причем если перекрестные помехи уменьшать применением узкополосного фильтра на приеме, то ограничивающим фактором становится межсимвольная интерференция. В [3] показано, что для частот между каналами более 50 ГГц влияние N_{XI} несущественно, поэтому на данном этапе основное внимание уделим первым двум составляющим.

Все предложенные в предыдущем разделе методы измерения шума были созданы для оценки ASE-составляющей и не способны достоверно определить нелинейные искажения.

Исторически сформировалось несколько подходов к рассмотрению шума в волоконно-оптических системах связи [3].

Первый метод – решение Нелинейного уравнения Шрёдингера во временной области. Сложность вычислений компенсирует полноту модели и наименьшее число допущений.

Затем был разработан FWM – метод (FWM – *Four Wave Mixing*), в котором вычисления производятся в частотной области. Исходный сигнал раскладывается на частотные составляющие и анализируется их взаимодействие, сопровождающееся образованием новых комбинационных частот по классическим формулам четырехволнового смешения.

Общая проблема для двух подходов – они не описывают поведения шума для систем с компенсацией хроматической дисперсии.

В связи с развитием когерентных систем связи модель линейного тракта несколько видоизменилась. В частности, наличие когерентного приемника с мощным DSP-модулем, встроенным в приемопередающий модуль (транспондер) позволяет уйти от физической компенсации дисперсии. Теперь CDC-алгоритмы (CDC – *Chromatic dispersion compensation*) являются частью сложного процесса обработки сигнала для последующего детектирования.

Отсутствие компенсации дисперсии в волокне рандомизирует нелинейный шум. Так, например, уширение импульса из-за большой накопленной дисперсии рассредоточивает действие нелинейных искажений.

Спектральная близость каналов, многопролетность и протяженность линий также приводят к размытию формы импульса. При таких условиях можно спроецировать центральную предельную теорему из теории вероятности на нашу систему: взаимодействие процессов с различными распределениями случайных величин приводит к случайному процессу с нормальным распределением. Следовательно, под действием дисперсионного уширения импульса, многоканальности

и дальнобойности системы с нелинейными процессами в ОВ, распределение нелинейного шума можно считать гауссовым, а значит, сохраняется свойство аддитивности. Теперь справедлива общая формула для OSNR:

$$OSNR = \frac{P_{ch}}{P_{ASE} + P_{NLI}}.$$

Автор статьи полагает, что такой подход к природе шума делает возможным применение нового метода оценки OSNR. С помощью измерения корреляционных свойств сигнала в частотной области на передаче и на приеме, а затем установлением связи между их количественными характеристиками, можно получать значения OSNR в каналах. В настоящее время ведется работа над математическим аппаратом, его экспериментальным подтверждением, а также оценкой точности разрабатываемого метода.

Несомненным плюсом предложенного подхода является возможность математической обработки точек непосредственно той части спектра, которая несет в себе полезную информацию, то есть для измерений не требуется использование межканального интервала и отключение информационных сигналов. Метод предположительно может использоваться и в условиях фильтрации.

Область практического применения алгоритма – многоканальные когерентные DWDM-системы с отсутствием компенсации хроматической дисперсии и большим числом одинаковых пролетов.

С применением такого способа оценки OSNR связаны определенные инженерные задачи – в частности, отлаженная работа системы управления, с помощью которой можно в служебном канале передавать массив измерений с передачи на прием для референсных вычислений, что не является проблемой в современных системах.

Для получения измерений на передаче или на приеме могут быть использованы как внешние спектроанализаторы с хорошим разрешением, подключенные к служебным разъемам мониторинга, так и измерители мощности в каналах (ОСМ – *Optical channel monitor*), встроенные, например, в блоки оптических мультиплексоров и демультиплексоров.

Выводы

Особенно актуальным автор видит применение метода в программно-управляемых «умных» сетях, где получаемые при постоянном мониторинге данные об OSNR можно использовать для автоматической регулировки системы передачи. Например, при ухудшении OSNR в определенной части спектрального диапазона, система управления могла бы передавать сигналы в оптические усилители для изменения режима их работы или на оптические аттенюаторы, использующиеся для выравнивания группового спектра на передаче.

В статье были рассмотрены существующие методы оценки шума и OSNR в современных системах связи с указанием их недостатков, большое число которых требует поисков новых решений. Предложенный способ на данный момент только начинает разрабатываться автором и постепенно будет заполняться математическими обоснованиями, которые будут изложены в следующих номерах.

Литература

1. Богданова Е., Сигаев А. Петлевой метод исследования протяженной системы DWDM // Первая Миля. 2017. № 1 (62). С. 50–55.
2. Carena A., Curri V., Bosco G., Poggiolini P., Forghieri F. Modeling of the Impact of Nonlinear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30. Iss. 10. pp. 1524–1538.
3. Poggiolini P. The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30. Iss. 24, pp. 3857–3879.
4. Богданова Е., Вайткевич К., Сигаев А. Протяженные DWDM-системы: физическое и компьютерное моделирование // Фотон-экспресс. 2016. № 5 (133). С. 30–33.

References

1. Bogdanova E., Sigaev A. Loopback Method for Study of Long-Range DWDM System // Last Mile. 2017. No. 1 (62). pp. 50–55.
2. Carena A., Curri V., Bosco G., Poggiolini P., Forghieri F. Modeling of the Impact of Nonlinear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30. Iss. 10. pp. 1524–1538.
3. Poggiolini P. The GN Model of Non-Linear Propagation in Uncompensated Coherent Optical Systems // Journal of Lightwave Technology. 2012. Vol. 30. Iss. 24, pp. 3857–3879.
4. Bogdanova E., Vaytkevich K., Sigaev A. Extended DWDM-Systems: Physical and Computer Modeling // Foton-express. 2016. No. 5 (133). pp. 30–33.

Богданова Евгения Геннадьевна

– аспирант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,
Российская Федерация, Evgenia15V@gmail.com

Bogdanova Evgenia

– postgraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232,
Russian Federation, Evgenia15V@gmail.com