

МАРШРУТИЗАЦИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДЕГРАДАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ

БОГДАНОВА Е.Г.,
Инженер ООО «Т8 НТЦ»

Подробную информацию об авторах см. на сайте www.fotonexpres.ru раздел «Наши авторы»

Предложен метод построения маршрута в оптической сети с использованием метрики, определяющей деградацию оптического отношения сигнал-шум. Задача маршрутизации решается с помощью CSPF-алгоритма, основанного на феноменологической модели, учитывающей как накопление шумов спонтанного усиления, так и нелинейные эффекты, действующие при распространении в волокне. Моделирование показало, что учёт нелинейностей при формировании маршрута в сложных многоканальных сетях снижает вероятность блокировки запроса на соединение между конечными узлами.

A method of constructing a route in an optical network using a metric determined by the degradation of the optical signal-noise ratio has been proposed. The task of routing is solved with the help of CSPF-algorithm, based on a phenomenological model, taking into account both the accumulation of spontaneous amplification noises and non-linear effects, which act when spreading in fiber. Simulations have shown that taking into account non-linearities in route formation in complex multichannel networks reduces the likelihood of blocking probability of the connection request between the end nodes.

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая сеть, реализованная по технологии DWDM (англ. DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing), на сегодняшний день рассматривается как наиболее надежное и экономичное решение не только для магистральных сетей, но и на уровне метро-агрегации. Новый сценарий использования стека технологий выделился с появлением сетей мобильной связи пятого поколения IMT-2020/5G. Кольцевая и смешанная топологии

Ключевые слова: Оптическая транспортная сеть, маршрутизация, оптическое отношение сигнал-шум, нелинейные эффекты, транспондер.

Keywords: Optical transport network, routing, optical signal-noise ratio, non-linear effects, transponder.

участка Backhaul вместе с жесткими требованиями к задержке, гибкости и управляемости определяют необходимость организации оптических транспортных сетей, согласно рекомендациям Международного Союза Электросвязи [1].

В случае, если сквозное соединение устанавливается в оптической области, и сигнал не претерпевает промежуточных опто-электрических преобразований, необходимо задать правильный алгоритм маршрутизации и выбора длины волны (англ. RWA – Routing and Wavelength Assignment), а также контролировать качество сигнала в приёмном узле. Главными причинами деградации оптического отношения сигнал-шум (англ. OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio), характеризующего качество оптического сигнала, является накопление шумов спонтанного усиления в эрбиевых усилителях, а также нелинейные шумы. Последние особенно важно учитывать в условиях многоканальности.

Работоспособность сети со сложной топологией, во многом, определяется алгоритмом маршрутизации, в частности, метриками, на основе которых строится «оптимальный» маршрут. Вопрос выбора метрик подробно рассмотрен в статье [2], где предлагается для сетей 5G учитывать одновременно задержки и OSNR. Параметр OSNR в [2] определяется только накоплением линейных шумов ASE (англ. ASE – Amplified Spontaneous Emission), а расчет производится для модели одноканальной системы. Задача данной работы показать, что учёт деградации оптического сигнала, вызванной нелинейными искажениями, важен при распределении нагрузки и выборе длины волны в многоканальных решениях. Такая балансировка позволяет, в свою очередь, уменьшить вероятность блокировки запрашиваемого соединения между конечными узлами.

Можно выделить несколько типов алгоритмов решения RWA-задачи для систем, где важно учитывать физические искажения сигнала. Первый подход предполагает определение сквозного маршрута в два этапа: на первой стадии работает определение вероятного пути для каждой длины волны на сетевом уровне по одному из классических

сетевых алгоритмов (например, SP–Shortest Path). Затем среди определенных вероятных сетевых маршрутов специализированный модуль физического уровня выбирает наиболее подходящий маршрут с учётом физических метрик, таких как OSNR, дисперсия, задержка. Последняя процедура алгоритма предполагает оценку Q-фактора или коэффициента ошибок BER (англ. BER – Bit Error Ratio) и его сравнение с допустимым (пороговым) значением.

Второй подход предлагает многопараметрический расчёт маршрута, то есть расчёт по принципу «hop-by-hop» сразу с учётом оптических параметров. Вычислительная сложность в данном случае повышается. Появляется необходимость в жесткой синхронизированной координации между сетевым уровнем, на котором происходит построение маршрута, и физическим уровнем, на котором будут происходить измерения параметров сигнала, если эти параметры не являются заведомо известными для всех узлов.

Введение дополнительных ограничений при формировании маршрута, связанное с учётом эффектов оптического уровня, повлекло выделение нового класса алгоритмов – CSPF (англ. – Constraint-based Shortest Path First), рекомендуемых для производителей оборудования оптических сетей организацией IETF (англ. – Internet Engineering Task Force). Основная сложность второго подхода – правильный выбор метрики для CSPF, на основе которой алгоритм будет принимать решение о следующем узле. В статье рассмотрим аналитическую модель деградации OSNR, учитывающую как шумы спонтанного усиления эрбиевых усилителей ASE, так и действие всех нелинейных эффектов в волокне. Простые аналитические уравнения модели хорошо описывают изменение сигнала, удобны при формировании метрики и ложатся в основу решения RWA-задачи. Оценка производительности DWDM-системы с программной маршрутизацией проводится в терминах вероятности блокировки соединения от загрузки сети.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВ

Рассмотрим деградацию OSNR при распространении сигнала по составному маршруту в оптической области. Физические искажения определяются мощностью сигнала на входе сетевого элемента с усилителем и параметрами самого усилителя, потерями в сетевых элементах, потерями в волокне и нелинейными эффектами в сочетании с накапливаемой дисперсией. На рисунке 1 представлен пример конфигурации сетевого узла, в котором происходит маршрутизация на уровне длин волн в оптических мультиплексорах ввода-вывода ROADM (англ. ROADM – Reconfigurable optical Add-Drop Multiplexer).

В результате прохождения оптического сигнала через каждый сетевой узел, имеющий в своём составе усилитель, к полезному сигналу добавляется шум спонтанного усиленного излучения, а линейная составляющая оптического отношения сигнал-шум уменьшается. OSNR_L на выходе узла *v* можно записать следующим образом:

$$OSNR_L [v] = \frac{P_{in}}{NF \cdot h \cdot f \cdot \Delta f} \quad (1);$$

NF – коэффициент шума оптического усилителя в линейных единицах, *h* – постоянная Планка (6.628×10^{-34} Дж·с), *f* (Гц) – центральная частота оптического канала, Δf (Гц) – полоса оптического канала, *P_{in}* (дБм) – уровень мощности на входе оптического усилителя в сетевом элементе с ROADM (с учётом потерь в оптических компонентах данного узла). Будем полагать, что спектр полезного сигнала меньше полосы ROADM и эффектом фильтрации можно пренебречь.

Преобразуем (1) таким образом, чтобы для расчёта значения $\frac{1}{OSNR_L(v)}$ на выходе узла *v* можно было использовать в качестве слагаемого $1/OSNR_{in}(v)$, где *OSNR_{in}(v)* – это отношение сигнал-шум на входе *v* (значение OSNR, рассчитанное для предыдущего узла с усилителем).

$$\frac{1}{OSNR_L(v)} = \frac{1}{OSNR_{in}(v)} + \frac{(NF - G)hf\Delta f}{P_{in}} \quad (2),$$

На качество сигнала помимо рассмотренных шумов спонтанного усиления при некоторых условиях оказывают влияние нелинейные искажения, которые претерпевает сигнал в оптическом волокне. При выполнении ряда условий нелинейный шум разной природы можно рассматривать как случайный процесс с нормальным распределением. Так отсутствие компенсации дисперсии,



Рис. 1. Пример сетевого узла с коммутацией длин волн в ROADM. EDFA – ErbiumDopedFiberAmplifier, OSC – OpticalSupervisorChannel, Tx/RxSC – передатчик/приёмник канала служебной связи OSC, OSC MUX/OSC DEMUX – мультиплексор/демультиплексор канала служебной связи OSC, SMF – SingleModeFiber.

спектральная близость каналов, многопролетность линии позволяют применить GN-модель (англ. Gaussian Noise) при расчёте полного шума.

Согласно GN-модели, нелинейные искажения разной природы можно рассматривать как аддитивный шум по отношению к рассмотренным выше шумам спонтанного усиления: $P_{\Sigma} = P_{ASE} + P_{NL}$. Именно полная мощность шума влияет на битовый коэффициент ошибок для данного приёмо-передающего модуля [3].

Полное оптическое отношение сигнал-шум, определяющее битовый коэффициент ошибок (англ. BER – Bit Error Ratio) до процедуры коррекции ошибок в приёмо-передающем модуле обозначается $OSNR_{BER}$ и связано с линейным $OSNR_L$ и нелинейным $OSNR_{NL}$ соотношением:

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_L} + \frac{1}{OSNR_{NL}} \quad (3);$$

Мощность нелинейного шума, определяющего $OSNR_{NL}$, связана со значением мощности данного канала на передаче через нелинейный коэффициент η (мВт^{-2}) следующим образом: $P_{NL} = \eta P^3$, где значение η зависит от длины пролёта, свойств волокна, коэффициента затухания и дисперсии, а также от взаимного расположения каналов в частотной сетке, но не зависит от входной мощности. Тогда можно определить второе слагаемое в (3):

$$\frac{1}{OSNR_{NL}} = \eta P^2 \quad (4);$$

η в (4) – это функция, пропорциональная фундаментальному коэффициенту нелинейности, специфичному для каждого транспондера в данной линии. Она учитывает зависимость от накопленной дисперсии, характеристик волокна и взаимного расположения каналов в текущей сетке частот.

Наибольшее влияние на значение коэффициента оказывает дисперсия. Согласно [3] коэффициент нелинейности может быть приближенно оценен следующим образом:

$$\eta(d) = \eta_0 \left[1 - \exp\left(-\mu - \left|\frac{d - d_0}{\rho d_0}\right|^{3/2}\right) \right] \quad (5);$$

μ – коэффициент, обратно пропорциональный затуханию в пролёте,

ρ и d_0 – коэффициенты, выражающие экспоненциальную зависимость от затухания.

При расчётах результирующего η должны быть также учтены значения фундаментального коэффициента нелинейности η_0 , измеренные для конкретных модулей транспондеров.

GN-модель удобна для прикладных расчётов при проектировании сети и при расчёте маршрута. В простейшем варианте нелинейные шумы в многопролетной линии могут рассматриваться как сумма нелинейных вкладов каждого участка, что удобно при формировании метрики маршрута. Однако, ряд исследований показывает, что нелинейный шум растёт от пролета к пролету несколько быстрее, чем линейная сумма, что может быть связано со взаимной корреляцией нелинейностей соседних пролетов [3]. Суперлинейная модель, описывающая такое накопление шума, устанавливает связь между значениями $OSNR$ отдельных i - участков многопролётной линии следующим образом:

$$\frac{1}{OSNR_{NL}} = \left(\sum_i \left(\frac{1}{OSNR_{NL,i}} \right)^{1+\xi} \right)^{\frac{1}{1+\xi}} \quad (6);$$

Значения коэффициента ξ находятся в диапазоне от 0 до 1 и зависят от природы каналов (некогерентный канал 10G/когерентный канал 100G) и наличия в линии компенсаторов дисперсии. Отметим, что суперлинейный характер сложения может быть учтён в виде штрафа 1-2 дБ.

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТРИКИ МАРШРУТА С УЧЁТОМ МОДЕЛИ ШУМА

В статье [2] рассмотрен пример расчёта маршрута для фрагмента Backhaul транспортной сети 5Gc учётом шумов усилителя на основе метрики, определяющейся линейным накоплением шумов от узла к узлу:

$$M_{OSNR_L}(v) = \frac{1}{OSNR_{in}} + \frac{\left(NF - \frac{1}{G(v)}\right) hf \Delta f}{P_{in}(v)} \quad (7);$$

С учётом формул (3)-(5) можно записать общее правило для приращения метрики с учётом как линейных, так и нелинейных искажений:

$$M_{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_L} + \frac{1}{OSNR_{NL}} = \frac{1}{OSNR_{in}} + \frac{\left(NF - \frac{1}{G}\right) hf \Delta f}{P_{in}} + \eta P^2 \quad (8);$$

ПРИМЕР РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКОГО МАРШРУТА С УЧЁТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

Рассмотрим простой сегмент DWDM сети, коммутация в которой реализована на уровне длин волн в устройствах ROADM. Каждый узел имеет архитектуру, представленную на рисунке 1, расстояния и связи между ними приведены на рисунке 2. Рассмотрим два «полных» маршрута, когда трафик проходит все узлы: E-C-D-A-B-G-F и E-C-A-B-G-D-F.

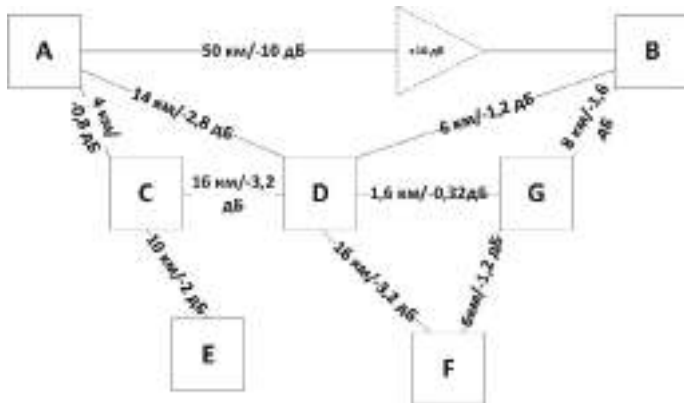


Рис. 2. Пример сети для расчёта метрики с учётом действия нелинейных эффектов в волокне

В предыдущей работе [2] был показан расчёт $OSNR_L$ на каждом сегменте указанных маршрутов и соответствующей метрики маршрута на основе $OSNR_L$. Проведем аналогичный расчёт по полной формуле (8), используя исходные данные из таблицы 1. Входные мощности в каждом усилителе узла вычислены исходя из потерь в пассивных оптических компонентах системы, а коэффициенты усиления настраиваются таким образом, чтобы компенсировать потери предыдущего сегмента маршрута.

Для рассмотрения физических процессов в волокне сравним два маршрута в терминах $OSNR_{BER}$ (дБ). Метрики при необходимости могут быть найдены простым преобразованием по формуле (8).

Таблица 1. Исходные данные для расчёта

Константы	Значение	Компонент	Потери
f	1,939E+14 Гц	ROADM 1:4	-7дБ
Δf	1,25E+10 Гц	OSC_1510	-1,5 дБ
h	6,62607004E-31 Дж*с	OB	0,2 дБ/км
$OSNR_{tx}$	37 дБ		
NF_{EDFA}	4,6 дБ		

Узел маршрута №1 (E-C-D-A-B-G-F)	P_{in} , дБм	Gain_Trans, дБ	Узел маршрута №2 (E-C-A-B-G-D-F)	P_{in} , дБм	Gain_Trans, дБ
E	-9,000	9,000	E	-9,000	9,000
C	-22,30	22,300	C	-22,30	22,300
D	-23,5	23,500	A	-21,1	21,100
A	-23,1	23,100	B	-30,3	30,300
B	-30,3	30,300	G	-21,9	21,900
G	-21,9	21,900	D	-20,62	20,620
F	-21,5	21,500	F	-23,5	23,500

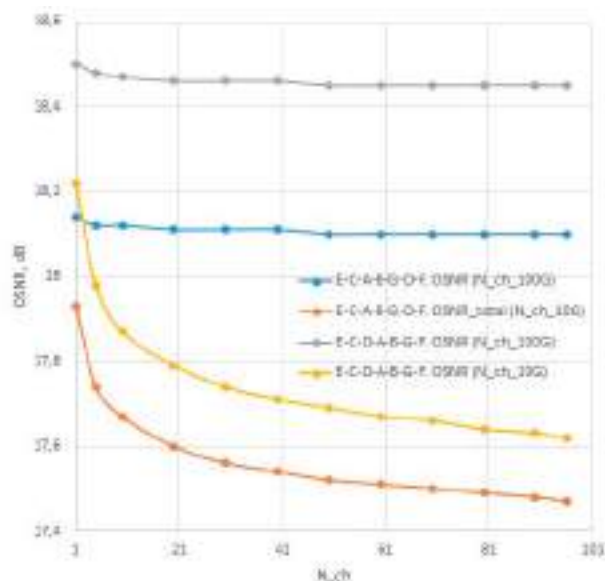


Рис. 3. Зависимость полного $OSNR_{BER}$ от числа и природы влияющих каналов

Результаты расчёта $OSNR_{BER}$ по маршрутам E-C-A-B-G-D-F и E-C-D-A-B-G-F для разного числа добавленных когерентных 100G-каналов, и для разного числа некогерентных 10G-каналов приведены на графике (рисунок 3). Количество соседних каналов меняется от одного до 96 возможных в частотном плане 50 ГГц. Рассматривается худшая ситуация, когда измеряемый канал находится в центре группы воздействующих каналов, т.е. при максимальном влиянии канальных групп слева и справа.

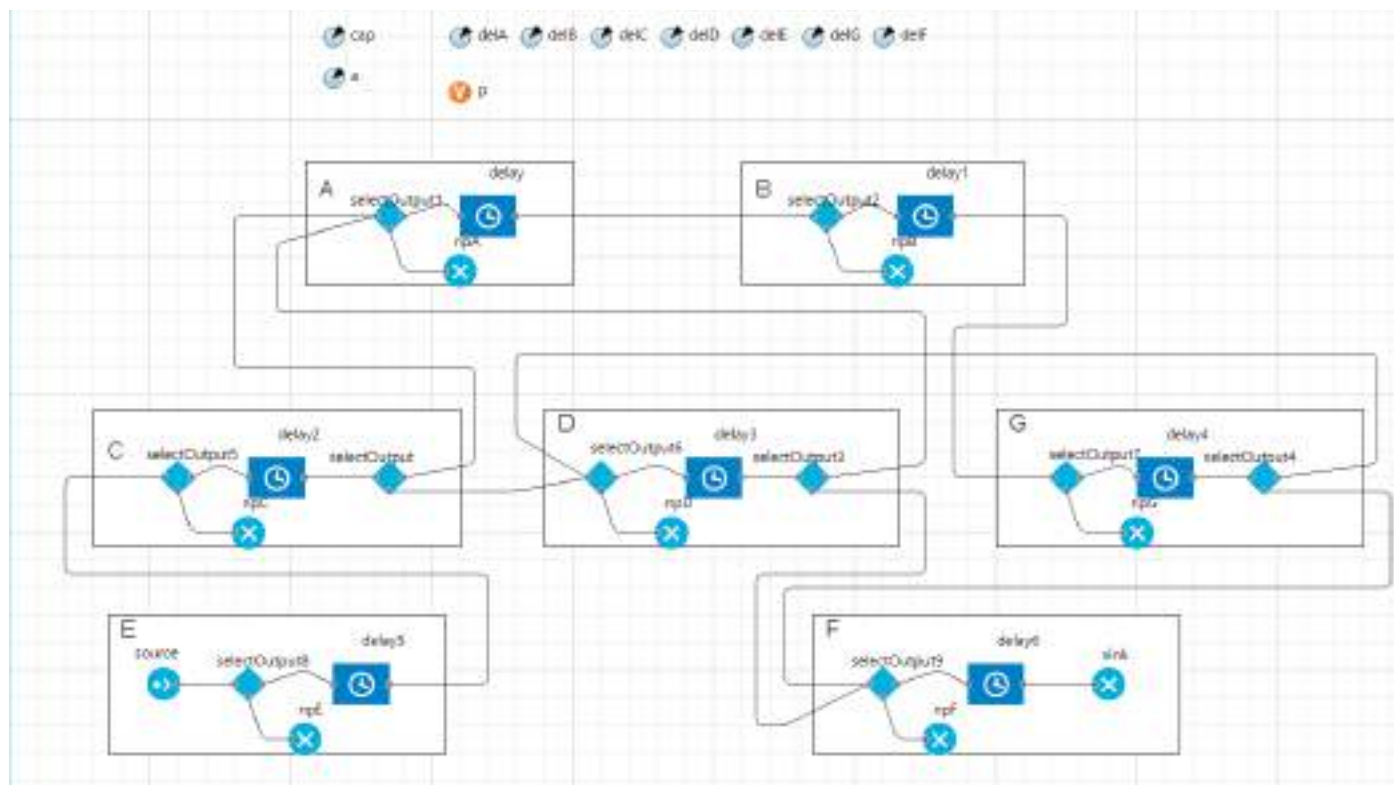


Рис. 4. Имитационная модель сети в AnyLogic. Source - источник заявок, SelectOutput - элемент выбора направления, delay - элемент задержки, имитирующий группу обслуживающих устройств, sink - элемент завершения обслуженных заявок и пр - элемент завершения неуспешных заявок на установление соединения [4].

В [2] показано, что для маршрута E-C-A-B-G-D-F результирующий $OSNR_L$ составляет 18.17 дБ, для маршрута E-C-D-A-B-G-F $OSNR_L$ составляет 18.54 дБ. Расчёты показали, что добавление в групповой спектр 100-гигабитного канала несущественно снижает полный $OSNR$ - нелинейный вклад при заданной канальной мощности составляет сотые доли дБ. Увеличение числа соседних когерентных каналов практически не вносит шумов.

Противоположная ситуация наблюдается при добавлении некогерентных низкоскоростных каналов. Даже один 10G-канал существенно уменьшает полный $OSNR_{BER}$ измеряемого когерентного канала.

В ряде случаев учёт нелинейности при вычислении маршрута избыточен. Сформулируем условия, при одновременном выполнении которых третья слагаемое в (8), отвечающее за нелинейную составляющую $OSNR$, можно не принимать в расчёт:

- Заранее известно, что все транспондеры в данной сети передают когерентные сигналы со скоростью не больше 100 Гбит/с¹;
- Правильно подобраны входные мощности в каждом из каналов на каждом сегменте;
- Расстояния между узлами невелики, а значит, большой усилительной мощности на входе в волокно не требуется.

Если хотя бы одно из условий не выполняется, необходимо учитывать действие нелинейных эффектов.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

Для демонстрации влияния нелинейных искажений на вероятность отказа установления соединения между конечными узлами проведём имитационное моделирование оптической сети в программном пакете AnyLogic.

В качестве нагрузки будем рассматривать поступающие заявки на установление соединения между узлами E и F. При установлении соединения канал занимает на все время предоставления end-to-end сервиса.

Результат моделирования – это зависимость вероятности блокировки соединения от интенсивности поступления заявок, измеряемой в Эрлангах для двух подходов к решению RWA-задачи: с использованием SP-алгоритма и с использованием CSPF-алгоритма.

В первом случае задача маршрутизации решается на сетевом уровне по алгоритму поиска кратчайшего пути (англ. SP – Shortest Path) с метрикой задержки сетевого уровня. На последнем этапе выполняется проверка, сравнивающая результирующий $OSNR_{BER}$ для данной длины волны с требуемым $OSNR_{треб}$ приемо-передающего модуля. $OSNR$ сигнала, прошедшего весь маршрут, оценивается на основании представленной модели шумов.

¹ Влияние когерентных каналов с большей боковой скоростью требует отдельного изучения

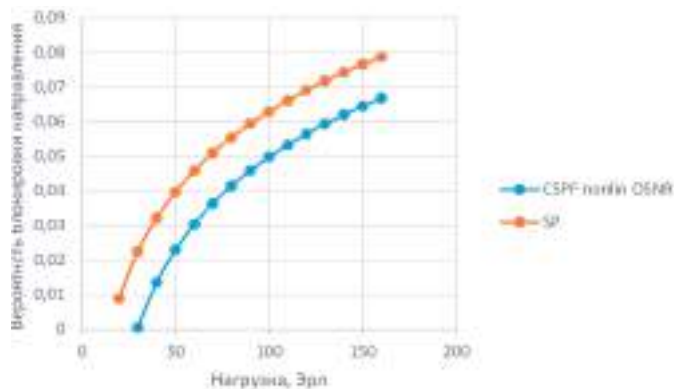


Рис. 5. Зависимость вероятности блокировки от интенсивности поступления запросов на соединение между узлами E-F без учёта искажений (SP-алгоритм маршрутизации на сетевом уровне) и с учётом искажений, в том числе нелинейных (CSPF-алгоритм маршрутизации на физическом уровне).

Второй сценарий – последовательное формирование маршрута с учётом оптических параметров («hop-by-hop» подход). CSPF-алгоритм работает на физическом уровне, используя представленную ранее модель шума для определения метрики на каждом сегменте (8).

На рисунке ниже представлена модель, соответствующая фрагменту рассматриваемой оптической сети, где совокупность элементов Delay, selectOutput, соответствует одному узлу системы.

Результаты расчёта в предыдущем разделе показали, что нелинейные взаимодействия в многоканальных системах с сигналами разной природы могут критично влиять на результирующее отношение сигнал-шум на приеме. Тогда при использовании первого метода маршрутизации выполнение проверки условия $OSNR_{BER} > OSNR_{треб}$ в приёмном узле может блокировать часть запросов на установление соединения. Причина в том, что маршрут был построен без учёта физических искажений. Кроме того, при работе SP-алгоритма на сетевом уровне весовые коэффициенты идентичны для всех каналов и не учитывают разные условия для разных длин волн в спектре.

Во втором подходе, «hop-by-hop», где OSNR оценивается на каждом шаге, принимаются в расчёт накопление шума, которое может отличаться для разных длин волн, воздействия соседних каналов, если они присутствуют. Алгоритм блокирует запрос, если на маршруте нет доступных длин волн, или OSNR на каком-либо сегменте опускается ниже требуемого значения на приёме.

Численная зависимость вероятности блокировки запроса на соединение между узлами E-F при поиске маршрута по SP-алгоритму, приведена в виде оранжевой кривой графика (рисунок 5).

CSPF-алгоритм, работающий с весовыми коэффициентами на основе приведенной модели OSNR, снижает вероятность отказа установления соединения, что демонстрирует синяя кривая на рисунке 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод маршрутизации в оптической сети на основе феноменологической модели физических искажений сигнала. В основе модели – деградация оптического отношения сигнал-шум из-за шумов спонтанного усиления EDFA-усилителей и одновременного действия нелинейных искажений. Представленные в [3] аналитические уравнения хорошо подходят для формирования метрики маршрута.

Преимущества CSPF-алгоритма маршрутизации, в основе которой феноменологическая модель, продемонстрированы в терминах вероятности блокировки соединения между конечными узлами для фрагмента оптической сети. Результаты имитационного моделирования показали снижение вероятности блокировки соединения при пошаговом формировании маршрута на физическом уровне с учётом значения полного OSNR относительно результатов, который даёт SP-алгоритм сетевого уровня.

Использование представленного метода маршрутизации позволяет распределять трафик в сложных оптических сетях и соблюдать, таким образом, баланс между стоимостью трафика для конечного потребителя и производительностью системы.

Дополнительного рассмотрения требуют временные параметры работы алгоритма, которые должны помимо времени вычисления учитывать взаимодействие устройств физического уровня с плоскостью управления.

Параметр OSNR, лежащий в основе алгоритма, расширяет применение метода. Так отношение сигнал-шум может быть найдено не только с помощью вычислений на основе феноменологической модели, но и с использованием других техник мониторинга вплоть до динамического измерения OSNR с помощью внешних измерительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Supplement 67 to ITU-T G-series Recommendations, Application of optical transport network Recommendations (07/2019).
2. Богданова Е. Оптическая маршрутизация в транспортной сети IMT-2020/5G // Первая миля, 2020. №1. С.78-85.
3. Konyshov V. Design of high-speed coherent communication lines / Konyshov V., Leonov A., Nanii O., Novikov A., Treshchikov V., Ubaydullaev R. // // Quantum electronics. Vol. 46. № 12. - P. 1121-1128. - 2016.
4. А.И. Парамонов, Маколкина М.А., Киричк П.В., Выборнова А.И., Богданова Е.Г. Математические модели в сетях связи. Раздел Лабораторный практикум. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, 2018. – 58 с.