ЗАВИСИМОСТЬ ПРОПУСКНОЙ способности DWDM-линий с когерентными каналами 100 Гбит/с DP-QPSK от ширины полосы и дальности передачи

Р.Ибрагимов, к.т.н., инженер компании "Т8",
В.Конышев, к.ф.-м.н., руководитель научной группы компании "Т8",
О.Наний, д.ф.-м.н., профессор МГУ им. М.В.Ломоносова,
начальник научно-исследовательского отдела компании "Т8",
В.Трещиков, к.ф.-м.н., генеральный директор компании "Т8",
старший научный сотрудник ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,
Р.Убайдуллаев, к.ф.-м.н., ведущий инженер компании "Т8"/ rru@t8.ru

УДК 681.7.068, DOI: 10.22184/2070-8963.2018.75.6.52.62

На основе анализа результатов экспериментальных исследований и численного моделирования построена феноменологическая модель DWDM-линии с когерентными 100 Гбит/с DP-QPSK-каналами. В модели наряду с шумом усиленного спонтанного излучения учитываются линейные кросс-канальные помехи от соседних каналов, а также нелинейное самовоздействие и перекрестное взаимодействие DWDM-каналов. Показано, что в линейном режиме, характерном для линий связи с умеренной дальностью (до 2000 км), пропускная способность прямо пропорциональна ширине полосы усиления и слабо зависит от дальности. При использовании усилителей с полосой 200 нм пропускная способность линий связи может превышать 75 Тбит/с. В нелинейном режиме (при дальности более 2000 км) пропускная способность быстро падает с увеличением дальности. Тем не менее при дальности до 4500 км пропускная способность линий связи с полосой 200 нм составляет 35 Тбит/с.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение пропускной способности оптических линий связи продолжает оставаться актуальной задачей благодаря сохранению быстрого роста потребности рынка в объемах передаваемой информации [1, 2]. Проведенные недавно исследования указывают на необходимость экспоненциального роста емкости

телекоммуникационных систем для обеспечения потребностей ИТ-рынка [3].

Современное поколение волоконно-оптических линий связи характеризуется различными методами передачи данных, позволяющими существенно увеличить общую производительность таких линий, не меняя кабельную инфраструктуру. Среди методов увеличения пропускной

способности наиболее экономичным, а следовательно, наиболее привлекательным решением представляется увеличение используемой для передачи информации полосы при сохранении имеющейся кабельной инфраструктуры. Альтернативные методы, такие как пространственное мультиплексирование и использование сложных многоуровневых форматов, являются более затратными в линиях связи большой протяженности. При использовании пространственного мультиплексирования необходима замена всей существующей кабельной инфраструктуры. А в случае использования многоуровневых форматов может потребоваться установка промежуточных регенераторов или дополнительных усилителей.

В данной статье показано, что максимально достижимая пропускная способность многоканальной, многопролетной (длины пролетов 100 км) системы передачи по одному волокну с использованием транспондеров 100 Гбит/с DP-QPSK может быть увеличена до 75 Тбит/с при использовании усилителей с полосой 200 нм, при этом дальность безрегенерационной передачи достигает 2 500 км. При увеличении дальности пропускная способность сокращается, но остается на уровне более 35 Тбит/с при длине линии до 5 000 км.

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОГЕРЕНТНОГО НЕЛИНЕЙНОГО DWDM-КАНАЛА В ЛИНИЯХ БОЛЬШОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ДИСПЕРСИИ

Существуют различные подходы к оценке работоспособности DWDM-линий в нелинейном режиме. Нами предложена феноменологическая модель когерентной оптической DWDM-линии, в которой учитывается влияние трех основных факторов, ведущих к деградации оптического сигнала: шума усиленного спонтанного излучения оптических усилителей, нелинейной самомодуляции и кросс-модуляции каналов, а также шума линейных перекрестных помех соседних каналов. Ранее было установлено, что нелинейные эффекты и перекрестные помехи можно приближенно описать как два дополнительных вида шумов, аддитивно складывающихся с шумами усиленного спонтанного излучения.

С помощью численного моделирования и проведенных ранее экспериментов установлены основные свойства трех видов шумов и предложена удобная для практических расчетов

феноменологическая модель, описывающая эволюцию характеристик оптического сигнала в протяженной DWDM-линии [4, 5].

Модель основана на следующих допущениях. Во-первых, нелинейные искажения рассматриваются количественно как гауссовский шум, допускающий сложение с шумом спонтанной эмиссии. Во-вторых, перекрестные помехи из-за перекрытия спектров соседних каналов при их сильном сближении также можно представить как избыточный аддитивный шум. В этом случае полная мощность шума просто равна сумме мощностей трех компонент шума (шума усиленного спонтанного излучения, нелинейного шума и шума кросс-канального взаимодействия):

$$P_{N, \text{Summ}} = P_{ASE} + P_{NL} + P_X. \quad (1)$$

Здесь $P_{ASE} = h\nu B A F N$ – ASE-шум от N пролетов (не зависит от мощности сигнала), $P_{NL} = \eta (K, \Delta f) \cdot P^3 N^{1+\epsilon}$ – нелинейный шум от N пролетов, $P_X = k_X (\Delta f) \cdot P$ – шум кросс-канального взаимодействия, проявляется единожды в фотоприемнике, где

h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-31}$ мВт·с²;

ν – референсная несущая частота оптического сигнала, $\nu = 193,1$ ТГц;

B – нормализованная ширина полосы, $B = 12,5$ ТГц;

A – затухание в оптическом пролете;

F – шум-фактор оптического усилителя;

η – коэффициент нелинейности, мВт⁻²;

k_X – коэффициент кросс-канального взаимодействия, безразмерный;

N – число оптических пролетов;

P – мощность канального сигнала на входе в пролет, мВт;

ϵ – параметр сверхлинейного сложения шумов многопролетной DWDM-линии (в DWDM-линиях без компенсации $\epsilon = 0,2$) [4].

Если ввести парциальные значения OSNR, равные отношению мощности сигнала к мощностям соответствующих парциальных компонент шума:

$$OSNR_L = \frac{P}{P_{ASE}} \text{ – линейный OSNR;}$$

$$OSNR_{NL} = \frac{P_{NL}}{P} \text{ – нелинейный OSNR;}$$

$$OSNR_X = \frac{1}{k_X(\Delta f)} \text{ – кросс-канальный OSNR, обуслов-$$

ленный сближением соседних каналов и перекрытием их спектров [5],

Рис.1. Зависимость коэффициента нелинейности от числа каналов при различных значениях расстояния между каналами

Рис.2. Зависимость коэффициента кросс-канального взаимодействия от расстояния между каналами (точки – экспериментально полученные значения [5])

$OSNR_{BER} = \frac{P}{P_{N_{Summ}}}$ – отношение сигнала к суммарному шуму, определяющее коэффициент ошибок;

то соотношение можно переписать в виде

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_L} + \frac{1}{OSNR_{NL}} + \frac{1}{OSNR_x} \quad (2)$$

Экспериментально показано, что коэффициент нелинейности η зависит от числа оптических каналов K в DWDM-системе, а также от расстояния между соседними каналами Δf [5], [6]. Эту зависимость удобно представить в следующем виде:

$$\eta(K, \Delta f) = \eta_\infty \cdot F(K, \Delta f), \quad (3)$$

где η_∞ – коэффициент пропорциональности (для SMF волокна $\eta_\infty = 1,15 \cdot 10^{-4}$ мВт $^{-2}$).

На основе обработки экспериментальных результатов для $F(K, \Delta f)$ получена следующая модельная зависимость:

$$F(K, \Delta f) = 1 + \frac{\lg K}{1 + 1,5 \Delta f / 100} \quad (4)$$

На рис.1 приведены зависимости от количества каналов для типовых значений.

Из рисунка видно, что коэффициент нелинейности возрастает более стремительно с увеличением числа каналов при меньших значениях межканального интервала.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КАНАЛАМИ НА OSNR BER

Экспериментальное исследование влияния когерентных соседних каналов на канал 100G DP-QPSK при сильном сближении описано в работе [5]. Аппроксимацией приведенных в этой работе данных была получена модельная зависимость коэффициента кросс-канального взаимодействия:

$$K_x(\Delta f) = 0,069 \cdot (\Delta f - 30,7)^{-0,74}. \quad (5)$$

График зависимости приведен на рис.2.

В эксперименте центральный канал окружался двумя каналами по обеим сторонам симметрично на расстоянии 33; 37,5; 50 ГГц.

ЗАВИСИМОСТЬ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА МОЩНОСТЕЙ И ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ОТ ЧИСЛА ПРОЛЕТОВ

При расчете волоконно-оптической системы связи требуется знать рабочий диапазон мощностей, вводимых в оптические пролеты (P_{max} , P_{min}), в пределах которого система связи остается работоспособной ($OSNR_{BTB} < OSNR_{BER}$).

При проектировании такой системы, как правило, предъявляется более жесткое требование. Используется понятие – запас по OSNR ($OSNR_M$). Данный параметр определяется следующим образом:

$$OSNR_M = \frac{OSNR_L}{OSNR_R}, \quad (6)$$

где $OSNR_L$ – линейный OSNR, определенный выше, полученный на основе измерений оптическим спектральным анализатором;

$OSNR_R$ – требуемый OSNR, минимальное значение линейного OSNR, полученное добавлением в линию шума до величины, при которой система связи перестает быть работоспособной.

Измеренный требуемый OSNR в конфигурации back-to-back принято обозначать $OSNR_{BTB}$. В нашем случае $OSNR_{BTB} = 11,92$ дБ [4].

На основании этого выражения для запаса по OSNR с учетом приобретает вид

$$OSNR_M = \frac{P}{C \cdot N} \left(\frac{1}{OSNR_{BTB}} - k_x - \eta P^2 N^{1+\varepsilon} \right). \quad (7)$$

При проектировании DWDM-линии с запасом $OSNR_M = m$ должно выполняться следующее неравенство:

$$\frac{m}{OSNR_L} + \frac{1}{OSNR_{NL}} + \frac{1}{OSNR_x} < \frac{1}{OSNR_{BTB}}. \quad (8)$$

Так, диапазон мощностей (P_{max2} , P_{min2}) соответствует случаю $m = 2$ (запас 3 дБ) (см. рис.3).

Установлено, что зависимости $OSNR_{BER}$ и $OSNR_M$ от мощности сигнала P имеют максимумы, которые достигаются при разных значениях P . По этой причине производят оптимизацию путем вычисления оптимальных мощностей сигнала на входе в каждый пролет двумя способами:

- по критерию максимизации $OSNR_{BER}$ (соответственно минимуму BER), оптимальная мощность P_B ;
- по критерию максимизации $OSNR_M$ (соответственно максимуму запаса по OSNR), оптимальная мощность P_M .

При оптимизации согласно второму способу можно строить DWDM-линии, более устойчивые к внесению дополнительного ASE-шума. Вводимая в пролеты мощность в этом случае больше. Таким образом, путем минимизации по P выражения находим P_B , а максимизируя, находим P_M [4, 7, 10]:

$$P_B = \left(\frac{C}{\eta \cdot N^\varepsilon} \right)^{1/3} \quad (9)$$

Рис.3. Зависимости максимальной и минимальной мощностей входного сигнала в полосе 40 нм с учетом 3 дБ от количества пролетов

$$P_M = \left[\frac{1}{3 \cdot \eta \cdot N^{1+\varepsilon}} \left(\frac{1}{OSNR_{BTB}} - k_x \right) \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Диапазон разрешенных мощностей позволяет определить максимальное число пролетов, которое может быть достигнуто в когерентной системе с заданной входной мощностью (рис.3).

Ширина рабочего диапазона входных мощностей $P_{max} - P_{min}$ уменьшается с увеличением числа пролетов [7].

ДАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ DWDM-СИСТЕМЫ С ПОЛОСОЙ 40 И 200 НМ

С помощью эмпирических выражений (2), (9), (10) можно произвести оценку дальности проектируемой системы связи для произвольных значений межканального интервала Δf и числа каналов K :

$$N = \left[\frac{4}{27} \cdot \frac{(OSNR_{BTB}^{-1} - k_x (\Delta f))^3}{\eta (K, \Delta f) \cdot (mC)^2} \right]^{\frac{1}{3+\varepsilon}}, \quad (11)$$

где m – определенный ранее энергетический запас в линии ($m = 1$ – запаса нет, $m = 2$ – запас 3 дБ).

Выражение позволяет рассчитать максимальную дальность N -канальной DWDM-системы. При этом, опорное значение $OSNR_{BTB} = 11,9$ дБ получено из ранее проведенных измерений. Зависимости числа каналов от полосы усиления для различных

Таблица 1. Максимальная дальность связи при различном расстоянии между каналами для полос усиления 40 и 200 нм, эксплуатационный запас 3 дБ

Полоса усиления W, нм	Расстояние между каналами, ГГц	Максимальная дальность, км	Спектральная эффективность SE, бит/с/Гц
40	33	1800	3
	37.5	3200	2,67
	50	3600	2
	100	4200	1
	200	4700	0.5
200	33	1800	3
	37.5	2900	2,67
	50	3450	2
	100	4000	1
	200	4500	0,5

значений предельного расстояния приведены в табл.1. Для справки приведены значения спектральной эффективности. Спектральная эффективность определяется как отношение скорости (в бит/с) передаваемых данных на 1 Гц используемой полосы частот. Для исследуемой нами системы передачи (каналы 100 Гбит/с) спектральная эффективность рассчитывается следующим образом:

$$SE = \frac{K \cdot 0,8}{W}, \text{ бит/с/Гц}, \quad (12)$$

где W – используемая полоса для передачи, выраженная в нм,

K – число спектральных каналов.

При межканальном интервале, превосходящем 150 ГГц, перекрестное нелинейное влияние каналов пренебрежимо мало и не изменяет значения η , согласно (4).

При добавлении новых оптических каналов определяется максимальная дальность, которую можно обеспечить в данной полосе усиления. Если при данном расстоянии между каналами отсутствует запас по OSNR, то расстояние увеличивается и дальность системы пересчитывается. На рис.4 приведены зависимости для оптической полосы 40 и 200 нм. В расчетах учитывался также запас по OSNR.

Расчет показывает, что при увеличении полосы усиления группового сигнала емкость системы увеличивается практически в пять раз. При этом максимальная дальность системы составляет 7900 км для полосы в 200 нм. Таким образом, переход от полосы усиления 40 нм к полосе 200 нм резко увеличивает емкость всей системы в целом, особенно это сильно отражается при работе на коротких линиях связи.

В экспериментах, проводимых ранее, максимальная дальность системы составила 4000 км для волокна SMF без компенсаторов дисперсии на линии. Эта величина ограничена максимальной хроматической дисперсией (70 000 пс/нм), которую позволяют скомпенсировать транспонеры, имеющиеся в линейке продукции компании "Т8" [8, 9].

Выводы

Рассмотрена принципиальная возможность работы DWDM-системы, использующей усилители с полосой 200 нм.

Описана и обоснована согласующаяся с экспериментальными данными феноменологическая модель, удобная для расчета структуры и параметров линий связи, выполняемого при проведении проектных работ.

Рис.4. Зависимость максимального количества каналов от протяженности оптической линии, верхние четыре кривые: W = 200 нм, нижние четыре кривые: W = 40 нм

При помощи этой модели оценена возможность увеличения пропускной способности DWDM-линий с каналами 100 Гбит/с DP-QPSK за счет увеличения рабочего диапазона спектра (вплоть до 200 нм). Показано, что с учетом используемого при проектировании энергетического запаса до 3 дБ пропускная способность DWDM-линий длиной до 2000 км может быть увеличена до 75 Тбит/с. При увеличении дальности пропускная способность DWDM-линий уменьшается, но остается на уровне 15 Тбит/с при дальности 5000 км.

Таким образом, расширение рабочего спектрального диапазона волоконно-оптических линий связи позволяет существенно увеличить их пропускную способность без замены существующей кабельной инфраструктуры. Такое расширение рабочей полосы оптических усилителей с сегодняшних 40 до 200 нм обеспечивает пятикратное увеличение пропускной способности ВОЛС, что продлевает срок их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Леонов А.** и др. Тенденции развития оптических систем дальней связи // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 2. С. 123–145.
2. **Трещиков В.** Разработка DWDM-системы емкостью 25 Тбит/с // Фотон-экспресс. 2013. № 3. С. 31–35.
3. **Winzer P.J. and Neilson D.T.** From scaling disparities to integrated parallelism: A decathlon for a decade // Journal of Lightwave Technology, 2017. V. 35. N 5. P. 1099–1115.
4. **Konyshev V.A.** et al. Design of high-bit-rate coherent communication links // Quantum Electronics. 2016. V. 46. N 12. P. 1121.
5. **Konyshev V.A.** et al. Experimental study and numerical modelling of a 3×100G DP-QPSK superchannel // Quantum Electronics. 2017. V. 47. N 8. P. 767.
6. **Gainov V.** et al. Record 500 km unrepeated 100 Gbps transmission // Laser Physics Letters. 2013. V. 10. N 7. P. 075107.
7. **Konyshev V.** et al. New method to obtain optimum performance for 100 Gbps multi-span fiber optic lines // Optics communications. 2015. N 355. P. 279–284.
8. **Гуркин Н.В.** и др. Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 6. Р. 550–553.
9. **Гуркин Н.** и др. Передача DWDM-сигнала // Вестник связи. 2012. № 8. С. 25–27.

DEPENDENCE OF THE BANDWIDTH of DWDM lines with coherent 100G DP-QPSK channels on bandwidth and transmission range

R.Ibragimov, Candidate of Technical Sciences, Engineer, "T8",
V.Konyshev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the scientific group, "T8"
O.Naniy, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of
M.V.Lomonosov Moscow State University, Head of Research Department, "T8",
V.Treschikov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, General Director, "T8",
Senior Researcher in V.A.Kotelnikov Institute of Radio-engineering
and Electronics of the Russian Academy of Sciences,
P.Ubaidullayev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
leading engineer "T8"/rru@t8.ru

A phenomenological model of the DWDM line with coherent 100G DP-QPSK channels based on experimental data and numerical modeling is proposed. In addition to the noise of amplified spontaneous emission, the cross-coupling of adjacent channels, as well as nonlinear self-interaction and cross-coupling of DWDM channels. It is shown that in the linear mode, characteristic for communication lines with a moderate range (up to 2000 km), the throughput is directly proportional to the width and depends little on the range. When using amplifiers with a bandwidth of 200 nm, the line capacity can exceed 75 Tbps. In the nonlinear mode, at the rate of increase. However, at a range of up to 4500 km, the capacity of communication links with the 200 nm band is 35 Tbps.

INTRODUCTION

Increasing the capacity of optical communication lines continues to remain a relevant task by maintaining the rapid growth of market demand in the volume of transmitted information [1, 2]. Recent studies indicate the need for exponential growth in the capacity of telecommunications systems to meet the needs of the IT market [3].

The current generation of fiber-optic communication links is characterized by various methods of data transmission, which allows to significantly increase the overall performance of such lines without changing the cable infrastructure. Among the methods of increasing

the bandwidth, an increase in the bandwidth used to transmit information while maintaining the existing cable infrastructure seems to be the most economical, and therefore the most attractive solution. Alternative methods such as spatial multiplexing and the use of complex multi-level formats are more expensive in long-distance communication links. When using spatial multiplexing, all existing cable infrastructure needs to be replaced. And in case of using multi-level formats, it may be necessary to install intermediate regenerators or additional amplifiers.

In this article, it is shown that the maximum achievable throughput of a multi-channel, multi-span (100 km span distance) transmission system over

a single fiber using 100 Gb/s DP-QPSK transponders can be increased to 75 Tbps using amplifiers with a 200 nm band, while the range without regenerative transmission reaches 2500 km. With increasing range, the capacity is reduced, but remains at a level of more than 35 Tbps with a line length of up to 5000 km.

PHENOMENOLOGICAL MODEL OF COHERENT NONLINEAR DWDM CHANNEL IN THE LONG-DISTANCE LINES WITHOUT DISPERSION COMPENSATION

There are different approaches to assessing the performance of DWDM lines in the nonlinear mode. We have proposed a phenomenological model of a coherent optical DWDM line, which accounts for the influence of the three major factors leading to degradation of the optical signal: noise of amplified spontaneous emission of optical amplifiers, the nonlinear self-interaction and cross-coupling of channels, as well as the noise of linear cross-coupling of adjacent channels. It was previously established that nonlinear effects and cross-coupling can be described approximately as two additional types of noise additive to the noise of amplified spontaneous emission.

Numerical modelling and experiments conducted previously set basic properties of three kinds of noise and a model convenient for practical calculations phenomenological that describes the evolution of optical signal characteristics in an extended DWDM line is proposed [4, 5].

The model is based on of the following assumptions. Firstly, the nonlinear distortions are considered quantitatively as Gaussian noise, allowing the addition of spontaneous emission noise. Secondly, the cross-coupling due to overlapping spectra of adjacent channels in their strong convergence can also be represented as excessive additive noise. In this case, the total noise power is simply equal to the sum of the powers of the three noise components (noise of amplified spontaneous emission, nonlinear noise channel and cross-coupling noise):

$$P_{N,Summ} = P_{ASE} + P_{NL} + P_X. \quad (1)$$

Here $P_{ASE} = h\nu B A F N$ is ASE noise from N spans (it does not depend on signal strength), $P_{NL} = \eta(K, \Delta f) \cdot P^3 N^{1+\epsilon}$ is nonlinear noise from N spans, $P_X = k_X(\Delta f) \cdot P$ is the noise of channel cross-coupling, manifests itself once in a photodetector, where

h is the Planck's constant, $h = 6.626 \cdot 10^{-31} \text{ mW} \cdot \text{c}^2$;

ν is the reference carrier frequency of the optical signal, $\nu = 193.1 \text{ THz}$;

B is the normalized bandwidth, $B = 12.5 \text{ GHz}$;

A is the attenuation in the optical span;

F is the noise factor of the optical amplifier;

η is the coefficient of nonlinearity, mW^{-2} ;

k_X is the coefficient of channel cross-coupling, dimensionless;

N is the number of optical spans;

P is the power of the channel signal at the entrance to the span, mW ;

s is the parameter of superlinear noise addition of multi-span DWDM line (in DWDM lines without compensations = 0.2) [4].

If we introduce partial OSNR values equal to the ratio of the signal power to the powers of the corresponding partial noise components:

$$\text{OSNR}_L = \frac{P}{P_{ASE}} \text{ is the linear OSNR;}$$

$$\text{OSNR}_{NL} = \frac{P_{NL}}{P} \text{ is the nonlinear OSNR;}$$

$$\text{OSNR}_X = \frac{1}{k_X(\Delta f)} \text{ is the cross-channel OSNR, caused by}$$

the convergence of adjacent channels and the overlapping of their spectra [5],

$$\text{OSNR}_{BER} = \frac{P}{P_{N,Summ}} \text{ is the ratio of the signal to the total}$$

noise, which determines the error rate;

then the relation (1) can be rewritten in the following form

$$\frac{1}{\text{OSNR}_{BER}} = \frac{1}{\text{OSNR}_L} + \frac{1}{\text{OSNR}_{NL}} + \frac{1}{\text{OSNR}_X}. \quad (2)$$

It has been experimentally shown that the coefficient of nonlinearity η depends on the number of optical channels K in the DWDM system, as well as on the distance between neighboring channels Δf [5], [6]. It is convenient to represent this dependence in the following form:

$$\eta(K, \Delta f) = \eta_\infty \cdot F(K, \Delta f), \quad (3)$$

where η_∞ is the coefficient of proportionality (for SMF fiber $\eta_\infty = 1.15 \cdot 10^{-4} \text{ mW}^{-2}$).

Based on the processing of the experimental results for $F(K, \Delta f)$, the following model dependence was received:

$$F(K, \Delta f) = 1 + \frac{\text{Lg} K}{1 + 1.5 \Delta f / 100}. \quad (4)$$

Figure 1 shows the dependencies η from the number of channels for typical values of Δf .

Fig.1. Dependence of the coefficient of nonlinearity on the number of channels for different values of the distance between the channels

It can be seen from Fig.1 that the coefficient of nonlinearity increases more rapidly from an increase in the number of channels at lower values of the interchannel interval.

ESTIMATING THE EFFECT OF THE DISTANCE BETWEEN CHANNELS ON OSNR BER

Experimental study of the effect of coherent adjacent channels on the 100G DP-QPSK channel with a strong convergence is described in [5]. By approximating the data presented in this article, a model dependence of the channel cross-coupling coefficient was obtained:

$$K_X(\Delta f) = 0,069 \cdot (\Delta f - 30,7)^{-0,74}. \quad (5)$$

The dependence graph (5) is shown in Fig.2.

In the experiment, the central channel was surrounded by two channels on both sides symmetrically at a distance of 33, 37.5, 50 GHz.

DEPENDENCE OF THE OPERATING RANGE OF POWER AND THE OPTIMAL POWER OF THE COMMUNICATION SYSTEM ON THE NUMBER OF SPANS

When calculating fiber-optic communication systems it is necessary to know the operating range of the powers introduced to the optical spans ($P_{\max}$, $P_{\min}$), within which the communication system remains operational ($\text{OSNR}_{\text{BTB}} < \text{OSNR}_{\text{BER}}$).

Fig.2. Dependence of the coefficient of the channel cross-coupling on the distance between the channels (the points are the experimentally obtained values [5])

When designing such a system usually tougher requirements are specified. The concept of OSNR margin is used (OSNR_M). This parameter is defined as follows:

$$\text{OSNR}_M = \frac{\text{OSNR}_L}{\text{OSNR}_R}, \quad (6)$$

where OSNR_L is the linear OSNR, defined above, obtained on the basis of measurements by an optical spectral analyzer, OSNR_R is the required OSNR, the minimal linear value of OSNR, obtained by adding a noise line to a value at which the communication system stops being operational.

The measured required OSNR in the back-to-back configuration is customarily designated as OSNR_R . In our case $\text{OSNR}_{\text{BTB}} = 11.92$ dB [4].

Based on this, the expression (6) for the OSNR margin taking into account (2) takes the following form

$$\text{OSNR}_M = \frac{P}{C \cdot N} \left(\frac{1}{\text{OSNR}_{\text{BTB}}} - k_X - \eta P^2 N^{1+\epsilon} \right). \quad (7)$$

When designing DWDM line with a margin of $\text{OSNR}_M = m$ the following inequality must be observed:

$$\frac{m}{\text{OSNR}_L} + \frac{1}{\text{OSNR}_{NL}} + \frac{1}{\text{OSNR}_X} < \frac{1}{\text{OSNR}_{\text{BTB}}}. \quad (8)$$

Thus, the range of capacities ($P_{\max 2}$, $P_{\min 2}$) corresponds to the case $m = 2$ (the margin is 3 dB), see Fig.3.

It was found that the dependences of OSNR_{BTB} and OSNR_M on the signal power P have maxima that are reached for different values of P . For this reason, the

optimization is made through the calculations of the optimal powers at the input of each span in two ways:

- by the criterion of maximization of $OSNR_{BTB}$ (corresponding to the minimum of BER), optimal power P_B ;
- by the criterion of maximization of $OSNR_M$ (corresponding to the maximum OSRN margin), optimal power P_M .

When optimizing according to the second method, DWDM lines can be constructed more resistant to the introduction of additional ASE noise. The power introduced into the spans is larger in this case more. Thus, by P minimizing according to expression (2) we find P_B , and by maximizing (7) we find P_M [4, 7, 10]:

$$P_B = \left(\frac{C}{\eta \cdot N^\varepsilon} \right)^{1/3} \quad (9)$$

$$P_M = \left[\frac{1}{3 \cdot \eta \cdot N^{1+\varepsilon}} \left(\frac{1}{OSNR_{BTB}} - k_x \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

A range of permitted powers allows the maximum number of spans that can be achieved in the coherent system with a given input power, Fig.3.

The width of the operating range of input powers $P_{max} - P_{min}$ decreases as the number of spans increases [7].

RANGE OF OPERATION OF A BROADBAND DWDM SYSTEM WITH A BANDWIDTH OF 40 AND 200 NM

Using the empirical expressions (2), (9), (10), it is possible to estimate the range of the projected communication system for arbitrary values of the interchannel interval Δf and the number of channels K :

$$N = \left[\frac{4}{27} \cdot \frac{(OSNR_{BTB}^{-1} - k_x(\Delta f))^3}{\eta(K, \Delta f) \cdot (mC)^2} \right]^{\frac{1}{3+\varepsilon}}, \quad (11)$$

where m is the previously defined energy margin in the line ($m = 1$ – no margin, $m = 2$, margin is 3 dB).

The expression allows to calculate the maximum distance of the N -channel DWDM system. In this case, the reference value of $OSNR_{BTB} = 11.9$ dB is obtained from previous measurements. The dependences of the number of channels on the amplification band for various values of limiting distance are given in Table 1. For reference, the values of spectral efficiency are given. Spectral efficiency is determined as the ratio of the velocity (in bps) of data transmitted per 1 Hz of the frequency band used. For the studied transmission system (100 Gbps channels), the spectral efficiency is calculated as follows:

Fig.3. Dependences of maximum and minimum input power in the 40 nm band accounting for 3 dB on the number of spans

$$SE = \frac{K \cdot 0,8}{W}, \text{ bps/Hz}, \quad (12)$$

where W is the used transmission band, expressed in nm, K is the number of spectral channels.

With an inter-channel interval exceeding 150 GHz, the channel cross-coupling nonlinear effect is negligible and does not change the value of η , according to (4).

When adding new optical channels, the maximum range which can be provided in the given amplification band is determined. If at a given distance between the channels there is no OSNR margin, the distance increases, and the system range is recalculated. Fig. 4 shows the dependences for the optical bands of 40 and 200 nm. The calculations also took into account the OSNR margin.

The calculation shows that when the amplification band of the group signal increases, the capacity of the system increases by a factor of five. The maximum range of the system is 7900 km for the 200 nm band. Thus, the transition from the 40 nm amplification band to the 200 nm band dramatically increases the capacity of the whole system; this is especially strongly reflected when working on short communication lines.

In the experiments conducted earlier, the maximum range of the system was 4000 km for the SMF fiber without dispersion compensators on the line. This value is limited to a maximal chromatic dispersion (70,000 ps/nm), which allows to compensate for the transponder's available in the product line of "T8" [8, 9].

Table 1. Maximum communication range at different distance between the channels for amplification bands of 40 and 200 nm, operational margin is 3 dB

Amplification band W, nm	Distance between the channels, GHz	Maximum range, km	Spectral efficiency SE, bps/Hz
40	33	1800	3
	37.5	3200	2.67
	50	3600	2
	100	4200	1
	200	4700	0.5
200	33	1800	3
	37.5	2900	2.67
	50	3450	2
	100	4000	1
	200	4500	0.5

Fig.4. Dependence of the maximum number of channels on the length of the optical line, the upper four curves – $W = 200$ nm, the lower four curves – $W = 40$ nm

CONCLUSIONS

The principle possibility of the DWDM system operating using amplifiers with a band of 200 nm is considered.

A phenomenological model consistent with the experimental data is described and justified, which is convenient for calculating the structure and parameters of communication lines, performed during design work. This model is used to estimate the possibility of increasing the capacity of DWDM lines with 100 Gbps DP-QPSK channels by increasing the operating range of the spectrum (up to 200 nm). It is shown that, taking into account the energy margin of up to 3 dB used in the design, the throughput of DWDM lines up to 2000 km in length can be increased to 75 Tbps. As the range increases, the throughput of DWDM lines decreases, but remains at the level of 15 Tbps at a range of 5000 km.

Thus, the expansion of the working spectral range of fiber-optic communication lines allows to significantly increase their throughput without replacing the existing cable infrastructure. Such an expansion of the operating band of optical amplifiers from the current 40 nm to 200 nm provides a fivefold increase in the bandwidth of fiber-optic links, which prolongs the period of their operation.

REFERENCES

1. Leonov A., et al. Trends in the development of optical long-range communication systems // Applied photonics. 2016. 3 No. 2. P. 123-145.
2. Treschikov V. Development of a DWDM system with a capacity of 25 Tbps // Photon-express. 2013. No. 3. P. 31-35.
3. Winzer P.J. and Neilson D.T. From scaling disparities to integrated parallelism: A decathlon for a decade // Journal of Lightwave Technology, 2017. V.35. N. 5. P. 1099-1115.
4. Konyshev V.A. et al. Design of high-bit-rate coherent communication links // Quantum Electronics. 2016. V. 46. N. 12. P. 1121.
5. Konyshev V.A. et al. Experimental study and numerical modeling of a 3×100 G DP-QPSK superchannel // Quantum Electronics. 2017. V. 47. N 8. P.767.
6. Gainov V. et al. Record 500 km unrepeated 100 Gbps transmission // Laser Physics Letters. 2013. V. 10. N 7. P. 075107.
7. Konyshev V. et al. New method to obtain optimum performance for 100 Gbps multi-span fiber optic lines // Optics communications. 2015. N. 355. P. 279-284.
8. Gurkin N.V., et al. Nonlinear interference noise in the 100 Gbps communication system with the DP-QPSK modulation format // Quantum Electronics. 2013. V. 43. No. 6. P. 550-553.
9. Gurkin N. et al. Transmission of the DWDM signal // Vestniksvyazi. 2012. No. 8. P. 25-27.