

Нелинейный интерференционный шум в системах связи 100 Гбит/с с форматом модуляции DP-QPSK

Н.В.Гуркин, О.Е.Наний, А.Г.Новиков, С.О.Плаксин, В.Н.Трещиков, Р.Р.Убайдуллаев

В волоконных когерентных линиях связи со скоростью 100 Гбит/с без оптической компенсации хроматической дисперсии экспериментально измерена зависимость мощности нелинейного интерференционного шума от мощности сигнала и длины линии. Получено выражение для оптимальной мощности сигнала, при которой достигается максимальное превышение измеренного значения оптического отношения сигнал/шум (OSNR) линии связи над значением OSNR, требуемым для условно безошибочной работы. Экспериментально измеренная зависимость оптимальной мощности сигнала от длины линии хорошо согласуется с полученной теоретической формулой.

Ключевые слова: высокоскоростная когерентная линия связи, 100 Гбит/с, хроматическая дисперсия, компенсация хроматической дисперсии, нелинейный интерференционный шум, накопление нелинейного шума, оптическое отношение сигнал/шум, протяженная многопролетная волоконно-оптическая линия связи.

1. Введение

В результате замены традиционных систем дальней связи с канальной скоростью 10 Гбит/с, использующих амплитудную модуляцию, системами связи с фазовой модуляцией и канальной скоростью 40 Гбит/с существенно изменился характер нелинейных искажений передаваемых оптических сигналов [1–3]. Начавшийся переход к системам связи с канальной скоростью 100 Гбит/с характеризуется еще более радикальными изменениями в оптических системах связи – на смену системам с прямым преобразованием пришли когерентные системы связи.

В волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) без периодической компенсации дисперсии оптическое поле приобретает случайный характер из-за дисперсионных эффектов, приводящих к пространственному перекрытию множества передаваемых символов [4–6]. Вследствие большой накопленной дисперсии воздействие нелинейных эффектов ослабляется, становится случайным по своей природе и проявляется при детектировании как нелинейный шум [4–9]. В недавно предложенной теоретической модели, основанной на теории возмущений, получены простые аналитические выражения, очень удобные для анализа ВОСП без периодической компенсации дисперсии [5, 6]. Если полученные выражения справедливы, то они представляют собой эффективный инструмент разработки и проектирования систем связи нового поколения.

Н.В.Гуркин, А.Г.Новиков, В.Н.Трещиков, Р.Р.Убайдуллаев. ООО «Т8», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатерская, 44/1, оф.826; e-mail: novikov@t8.ru, rru@t8.ru

О.Е.Наний, С.О.Плаксин. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; ООО «Т8», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатерская, 44/1, оф.826; e-mail: naniy@t8.ru

Поступила в редакцию 2 октября 2012 г., после доработки – 7 декабря 2012 г.

Таким образом, экспериментальное исследование характера накопления нелинейных эффектов в линиях связи без компенсации дисперсии является исключительно важной задачей. Опубликовано всего несколько экспериментальных работ, в которых такие исследования проведены в ограниченной области параметров систем связи [7–9]. При этом в отличие от линейной зависимости мощности нелинейного интерференционного шума от длины линии, следующей из теории [4, 5] и полученной экспериментально [7], в работе [8] эта зависимость представлена в виде степенного закона с показателем степени 1.4.

Цель настоящей работы – подтверждение шумового характера нелинейных искажений в когерентных оптических линиях связи со скоростью 100 Гбит/с без компенсации хроматической дисперсии, экспериментальное исследование зависимости мощности нелинейного интерференционного шума от длины линии связи и от мощности сигнала, а также определение оптимальной мощности, при которой достигается максимальное превышение измеренного значения отношения сигнал/шум (OSNR) линии связи над требуемым для условно безошибочной работы. Нами использовалась методика, позволяющая проводить измерения в широком диапазоне изменений мощностей сигнала, шума усиленного спонтанного излучения и нелинейного интерференционного шума [3].

2. Экспериментальная установка

Исследования проводились на лабораторной модели многоканальной линии связи с плотным волновым мультиплексированием (DWDM), длина которой изменялась от 100 до 4000 км. Расстояние между соседними спектральными каналами было равно 50 ГГц, спектральная эффективность при канальной скорости 100 Гбит/с – 2 бит/Гц. Исследовались многопролетные линии, содержащие чередующиеся участки длиной 100 и 50 км стандартного оптического волокна (SSMF). Максимальная длина линии из 27 участков по 100 км и 26 участков по 50 км составляла 4000 км. Между участками волокна SSMF уста-

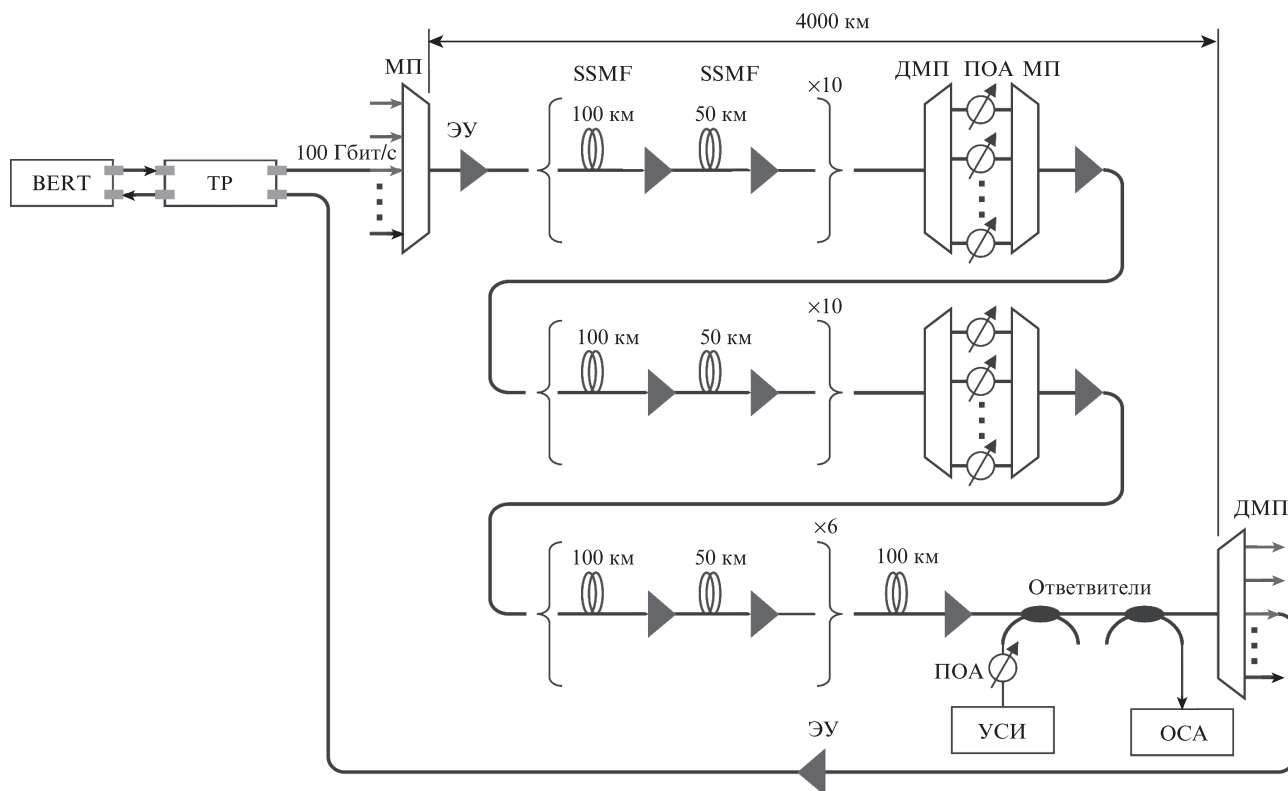


Рис.1. Схема экспериментальной установки:
BERT – BER-тестер; ЭУ – эрбиевый усилитель; TP – транспондер; ДМП – демультиплексор; ПОА – переменный оптический attenuator; МП – мультиплексор; УСИ – источник усиленного спонтанного излучения; ОСА – оптический спектроанализатор.

навливались эрбиевые усилители (ЭУ), полностью компенсирующие потери в волокне. Для ослабления шума усиленного спонтанного излучения после 1500 и 3000 км устанавливались оптические фильтры.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Оптический передатчик на основе лазера с распределенной обратной связью (РОС) и квадратурного модулятора Маха–Цендера преобразует электрический сигнал в оптический сигнал. Нами использовался четырехуровневый фазовый формат модуляции с поляризационным мультиплексированием (формат DP-NRZ-QPSK), который обеспечивает сочетание высоких спектральной и энергетической эффективностей за счет использования для кодирования информации всех четырех независимых параметров (степеней свободы) светового пучка: по две квадратуры в каждой из двух поляризаций. Таким образом, один символ несет четыре бита информации (символьная эффективность 4 бит/символ). Формат DP-NRZ-QPSK обеспечивает максимальную производительность системы связи, равную произведению дальности на суммарную скорость передачи информации [2]. Скорость передачи полезной информации составляет 100 Гбит/с.

В оптическом передатчике использовалась упреждающая коррекция ошибок с мягким принятием решения (Soft FEC) с избыточностью 15%. С учетом заголовков и служебной информации полная скорость в линии равна 120 Гбит/с, символьная скорость составила 30 Гбод с учетом символьной эффективности 4 бит/символ формата DP-NRZ-QPSK. Эффективная ширина полосы спектра сигнала равна 0.27 нм.

Для корректного измерения OSNR разрешение спектрального анализатора должно быть не меньше этого

значения. Источник усиленного спонтанного излучения (УСИ) позволяет изменять мощность широкополосного шума P_{ASE} на приемнике, а следовательно, и значение $OSNR_{ASE} = P_s/P_{ASE}$ (P_s – оптическая мощность сигнала, мощность шума P_{ASE} приведена к полосе 0.1 нм).

3. Мощность нелинейного шума

Структура сигнала при наличии шумов показана на рис.2. Здесь $\Delta\nu$ – полоса, для которой рассчитывалось значение OSNR на основании измерений оптического спектроанализатора (ОСА) (все измерения OSNR выполнялись в полосе 0.5 нм и приводились к полосе 0.1 нм); $\Delta\nu_{EI}$ – ширина полосы сигнала и равная ей полоса электрического фильтра.

Для измерения мощности нелинейного шума P_{NLI} , приведенной к полосе 0.1 нм, применялась методика, основанная на схеме «Back-to-Back», когда линия связи представляет собой короткий участок волокна длиной несколько метров, при этом нелинейный шум отсутствует ($P_{NLI} = 0$). Измеренное в этом случае при помощи ОСА значение $OSNR_T$, требуемое для обеспечения коэффициента ошибок $BER = 10^{-10}$, обозначим $OSNR_{T,ВТВ}$. Коэффициент ошибок 10^{-10} соответствует коэффициенту FEC. Экспериментально измеренное приведенное значение $OSNR_{T,ВТВ}$ равно 12.4 дБ.

После прохождения сигнала по линии связи к шуму усиленного спонтанного излучения P_{ASE} добавляется нелинейный интерференционный шум P_{NLI} , однако при измерении $OSNR_T$ оптическим анализатором спектра нелинейный шум не регистрируется, т. к. его спектр совпадает со спектром сигнала (рис.2). В предположении, что шумы

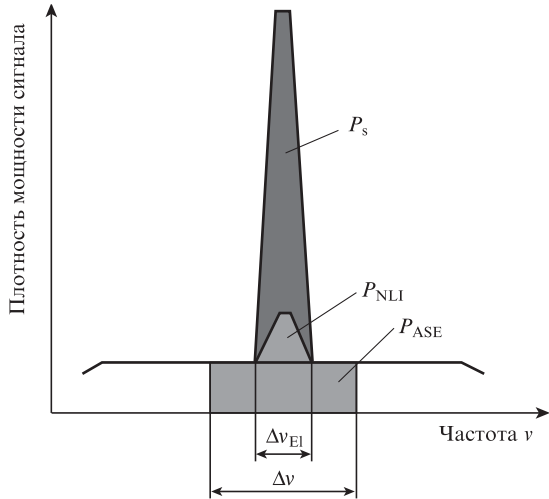


Рис.2. Спектральное представление сигнала и шума.

P_{ASE} и P_{NLI} складываются аддитивно, можно получить следующее выражение:

$$\frac{1}{OSNR_{T,BTB}} = \frac{1}{OSNR_T} + \frac{1}{OSNR_{NLI}}, \quad (1)$$

где $OSNR_{NLI} = P_s/P_{NLI}$. Подтверждением предположения об аддитивном характере сложения шума усиленного спонтанного излучения P_{ASE} и нелинейного интерференционного шума P_{NLI} является экспериментально установленное постоянство значения BER до FEC (1.9×10^{-2}) при критическом значении BER после FEC (1×10^{-10}).

Из формулы (1) по измеренным значениям $OSNR_T$ и $OSNR_{T,BTB}$ вычисляется $OSNR_{NLI}$, а затем P_{NLI} :

$$P_{NLI} = \frac{P_s}{OSNR_{NLI}} = P_s \left(\frac{1}{OSNR_{T,BTB}} - \frac{1}{OSNR_T} \right). \quad (2)$$

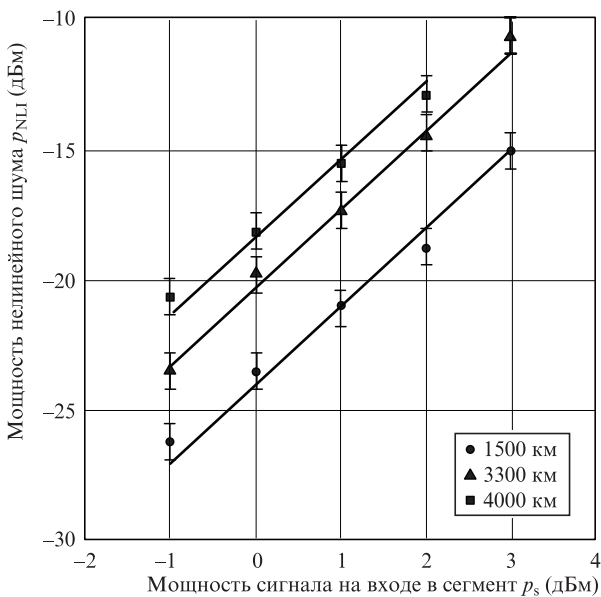


Рис.3. Зависимости p_{NLI} от p_s в многопролетных линиях разной протяженности. Наклон аппроксимирующих прямых равен трем.

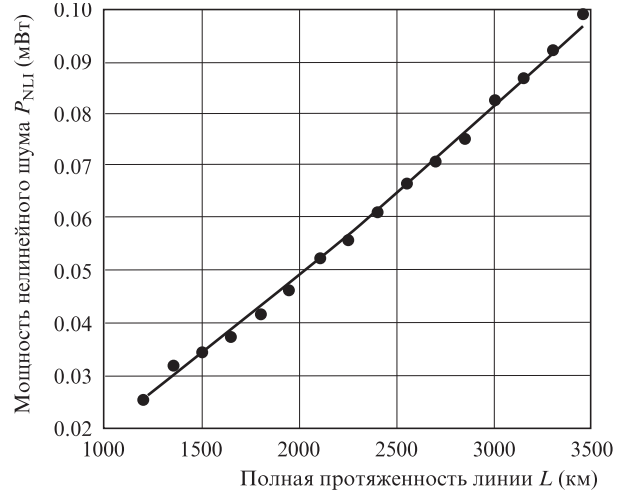


Рис.4. Зависимость мощности нелинейного шума от длины линии.

На рис.3 приведены зависимости p_{NLI} от p_s для многопролетных линий протяженности 1500, 3300 и 4000 км (здесь и далее строчными буквами обозначены значения мощности в логарифмических единицах: $p_{NLI} = 10 \times \lg(P_{NLI}/1 \text{ мВт})$, $p_s = 10 \lg(P_s/1 \text{ мВт})$, где P_{NLI} и P_s – мощности в мВт).

В двойном логарифмическом масштабе экспериментальные точки в пределах ошибки измерений совпадают с теоретической зависимостью мощности p_{NLI} от p_s [4]. В линейных единицах мощность нелинейного шума P_{NLI} пропорциональна кубу мощности сигнала:

$$P_{NLI} = A_{NLI}(L) P_s^3, \quad (3)$$

где $A_{NLI}(L)$ – зависящий от длины линии коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

При мощности входного сигнала 3 дБм была измерена зависимость P_{NLI} от длины линии связи L (рис.4). Аппроксимация экспериментальных значений степенной функцией $P_{NLI} = \chi_{NLI} L^{1+\epsilon}$ дает $\epsilon = 0.24 \pm 0.05$. Экспериментальная оценка ϵ согласуется с теорией [10].

4. Оптимальная мощность сигнала

Для оценки надежности системы связи удобно использовать такой параметр, как запас по OSNR ($OSNR_M$), который определяется следующим выражением:

$$OSNR_M = \frac{OSNR_L}{OSNR_T}, \quad (4)$$

где $OSNR_L$ – измеряемое при помощи спектроанализатора значение OSNR на выходе линии связи.

Результаты измерений зависимости $OSNR_M$ от мощности сигнала приведены на рис.5 для линий разной длины. Как следует из приведенных графиков, при определенной мощности сигнала, которую назовем оптимальной мощностью P_s^{opt} , достигается максимальное значение $OSNR_M$.

Результаты экспериментально измеренной оптимальной мощности P_s^{opt} при различных длинах линии представлены точками на рис.6. Аппроксимация экспериментальных точек степенной зависимостью дает выражение $P_s^{opt} \approx \xi L^{-0.61}$ [мВт] (ξ – коэффициент пропорциональности).

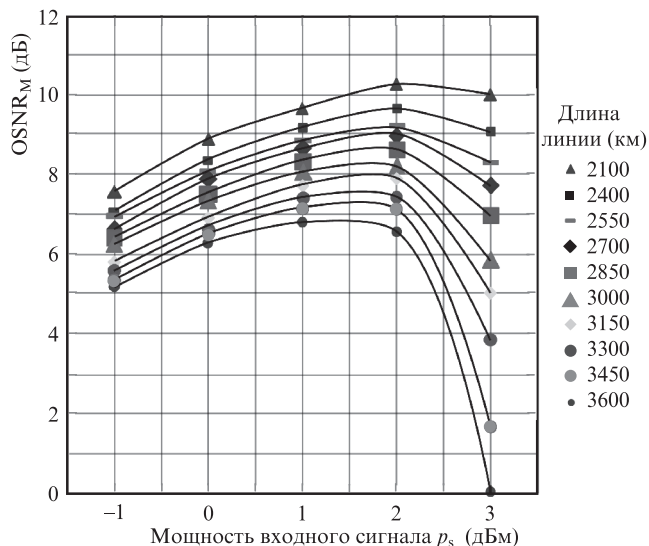


Рис.5. Зависимости запаса по OSNR от мощности сигнала на входе в сегмент при различных длинах линии.

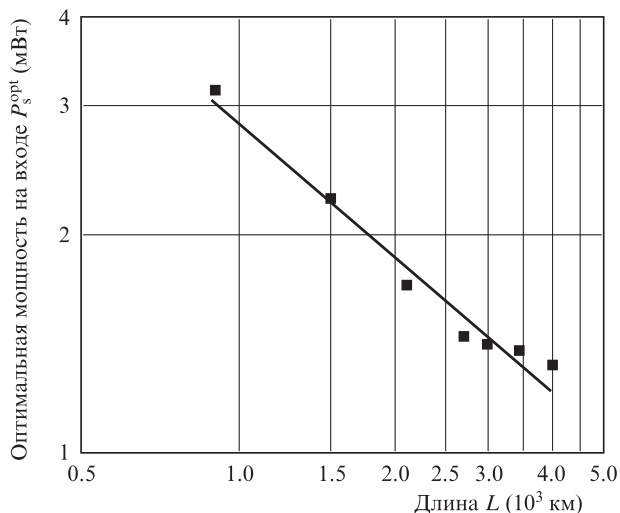


Рис.6. Зависимость оптимальной мощности от длины линии.

5. Обсуждение результатов

Измеренные экспериментально зависимости мощности нелинейного шума от мощности сигнала и длины линии связи достаточно хорошо совпадают с теоретическими зависимостями, полученными в предположении, что нелинейные искажения в когерентных системах связи без оптической компенсации дисперсии имеют характер аддитивного гауссова шума. Линейная зависимость мощности шума от длины линии свидетельствует о том, что нелинейный шум, возникающий в разных пролетах, независим и корреляция полностью отсутствует.

Чтобы получить явное теоретическое выражение для связи оптимальной мощности сигнала с параметрами линии связи, рассмотрим теоретическую модель исследованной линии. Как было показано в работах [4–6], в длинных линиях связи без компенсаторов дисперсии нелинейные искажения проявляются в виде дополнительного (нелинейного) шума. Отклонения фаз относительно

их средних (номинальных) значений (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$) описываются распределением Гаусса.

Мы полагаем в этих рассуждениях, что коэффициент ошибок BER зависит исключительно от отношения сигнал/полный шум, а соотношение между уровнями шумов не важно. Таким образом, если в многопролетной системе полный шум на фотоприемнике ($P_{ASE} + P_{NLI}$) меньше максимального допустимого шума усиленного спонтанного излучения на приемнике в схеме «Back-to-Back» ($P_{TASE,BTB}$), то BER многопролетной системы не превышает допустимое значение. Разность

$$\Delta P_N = P_{TASE,BTB} - P_{ASE} - P_{NLI} \tag{5}$$

между $P_{TASE,BTB}$ и величиной шума в конце линии ($P_{ASE} + P_{NLI}$) является важным параметром системы связи. Этот параметр соответствует допустимому уменьшению OSNR, вызванному любыми причинами, например увеличением затухания в линии связи. Определим, при каком значении оптимальной мощности P_s^{opt} величина ΔP_N достигает максимума. Делая подстановки $P_{TASE,BTB} = P_s^{opt} OSNR_{T,BTB}$ и $P_{NLI} = N^{1+\epsilon} A_{NLI} P_s^3$ (нелинейный шум накапливается на N пролетах), а также считая, что P_{ASE} не зависит от P_s , из условия $d(\Delta P_N)/dP_s = 0$, которое определяет экстремум ΔP_N , находим мощность сигнала на входе:

$$P_s = (3N^{1+\epsilon} OSNR_{T,BTB} A_{NLI})^{-1/2} \tag{6}$$

В результате мы получаем зависимость от длины: $P_s \sim L^{-(1+\epsilon)/2}$.

6. Заключение

Экспериментально подтверждено предположение о том, что нелинейные искажения в системах связи 100 Гбит/с с форматом DP-QPSK без оптической компенсации хроматической дисперсии имеют характер шума (нелинейный интерференционный шум). Экспериментально показано, что мощность нелинейного интерференционного шума пропорциональна третьей степени мощности сигнала и зависит от длины линии L при длинах более 1000 км по закону $L^{1.24}$.

Экспериментально и теоретически показано, что оптимальная мощность сигнала, при которой достигается максимальное значение отношения измеренного OSNR линии связи к OSNR, требуемому для условно безошибочной работы (величина запаса по OSNR), зависит от L при длинах более 1000 км по закону $L^{-0.61}$.

1. Редюк А.А. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 929 (2011).
2. Наний О.Е., Трещиков В.Н. *Вестник связи*, **4**, 52 (2011).
3. Наний О.Е. и др. *Электросвязь*, № 6, 40 (2012).
4. Carena A. et al. *J. Lightwave Technol.*, **30** (10), 1524 (2012).
5. Poggiolini P. et al. *IEEE Photon. Technol Lett.*, **14**, 742 (2011).
6. Carena A. et al. *Proc. of ECOC* (Torino, Italy, 2010, Paper P4.07).
7. Sinkin O.V. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Los Angeles, CA, USA, 2012, Paper OTu1A.2).
8. Vacondio F. et al. *Proc. ECOC* (Geneva, Switzerland, 2011, Paper We.7.B.1).
9. Torrenge E. et al. *Proc. ECOC* (Geneva, Switzerland, 2011, Paper We.7.B.2).
10. Poggiolini P. *Proc. ECOC* (Amsterdam, the Netherland, 2012, Paper Th.2.G.1).