

Прямое моделирование статистики ошибок при передаче данных по высокоскоростной линии связи с помощью четырёхуровневого фазового формата модуляции

А.А.Редюк, А.С.Скидин, А.В.Шафаренко, М.П.Федорук

Представлены результаты математического моделирования передачи информации оптическими импульсами по волоконной линии связи со скоростью 80 Гбит/с в одном спектральном канале с использованием четырёхуровневого фазового формата модуляции. Исследовано влияние нелинейных эффектов на профиль оптических импульсов при их распространении по волокну. С помощью прямого детектирования оптического сигнала проанализирована статистика ошибочно принятых символов и показано её неравномерное распределение по различным сочетаниям символов.

Ключевые слова: волоконно-оптическая линия связи, нелинейные искажения, четырёхуровневый фазовый формат модуляции, математическое моделирование.

1. Введение

Постоянный рост объёма информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), стимулирует поиск возможностей увеличения их пропускной способности. Известно, что этого можно добиться путём увеличения как количества спектральных каналов, одновременно передающихся по оптическому волокну, так и скорости передачи данных в одном канале. Для увеличения количества каналов разрабатываются волокна с новыми окнами прозрачности, в которых затухание оптического сигнала составляет менее 0.2 дБ/км [1]. Изучаются также возможности уменьшения спектральной ширины соседних каналов. Однако с ростом числа каналов растёт мощность вводимого в световод излучения, что усиливает влияние нелинейных эффектов на распространение оптических импульсов. Для увеличения скорости передачи данных в одном канале используются многоуровневые фазовые форматы [2], возможность применения которых в волоконной оптике интенсивно исследуется в настоящее время благодаря развитию технологии когерентного приема сигнала [3, 4]. Таким образом, предпосылками значительного роста влияния нелинейных эффектов на передачу данных являются увеличение мощности вводимого в волокно сигнала, увеличение символьной скорости от 10 до 100 Гбод в одном спектральном канале и применение недвоичных форматов передачи данных.

Следствием такого влияния может быть так называемый паттерн-эффект (patterning effect), заключающийся в зависимости качества передачи информации от характера самой информации [5–11]. Наиболее ясно он наблюдается в таблице статистики ошибок по различным элементарным битовым последовательностям. Знание распределения статистики ошибочных битов при передаче данных по ВОЛС является важной частью разработки схем прямой коррекции ошибок. Использование такой информации в схемах коррекции ошибок, предложенное в [7], успешно применено в [8–11]. Данные схемы могут улучшить качество приема сигнала в том случае, когда искажения передаваемого сигнала нельзя скомпенсировать активными компонентами самой системы. Эти искажения могут быть следствием различных физических явлений. Например, для амплитудного бинарного формата передачи данных «включено–выключено» установлено, что эффект четырёхволнового смешения приводит к возникновению «импульсов-призраков» [12–16]. Появление таких импульсов является показательным примером действия паттерн-эффекта в оптических каналах, когда вероятность битовой ошибки зависит от окружающих битов. Так, в работе [6] было показано, что для формата «включено–выключено» битовые сочетания, содержащие последовательность «101», имеют максимальную вероятность быть принятыми с ошибкой в центральном «нуле». Из анализа статистики ошибок для бинарного дифференциального фазового формата, проведенного в [8], следует, что в этом случае наиболее подвержены ошибкам центральные биты сочетаний «010» и «101».

Современные ВОЛС позволяют передавать информацию со скоростью десятки терабит в секунду по сотням частотных каналов, в каждом из которых информация передается со скоростями до 100 Гбит/с [17, 18]. При этом один из главных вопросов, который требует исследования, состоит в том, каким образом увеличение мощности сигнала (неизбежное при увеличении количества частотных каналов в линии) влияет на качество его передачи по отдельным каналам. В случае каналов с бинарными форматами модуляции и небольших скоростей передачи этот вопрос хорошо изучен [8, 19]; установлена зависимость

А.А.Редюк, А.С.Скидин. Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; e-mail: redyuk@ict.sbras.ru, ask@skidin.org

М.П.Федорук. Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: mife@ict.nsc.ru

А.В.Шафаренко. University of Hertfordshire; College Lane, Hatfield, Hertfordshire, AL10 9AB, United Kingdom; e-mail: a.shafarenko@herts.ac.uk

Поступила в редакцию 6 апреля 2012 г., после доработки – 14 мая 2012 г.

качества передачи информации от её вида: статистика ошибок по различным передаваемым двоичным последовательностям является неравномерной. Для недвоичных форматов аналогичное исследование не проводилось, а поскольку они лежат в основе проектирования современных ВОЛС, их исследование позволяет описать особенности применения таких форматов, а также выработать решения, способствующие улучшению качества приёма информации при больших мощностях в линии.

Настоящая статья посвящена математическому моделированию передачи информации с помощью оптических сигналов по ВОЛС со скоростью 80 Гбит/с (40 Гбод) в одном спектральном канале с использованием четырёхуровневого фазового формата модуляции (QPSK). Представлены результаты прямого детектирования сигнала на приёмнике. Получено распределение ошибочно принятых символов по различным символьным сочетаниям, которое показывает наличие сильного паттерн-эффекта.

2. Конфигурация линии связи

Схема линии связи, для которой выполнялись численные расчёты, представлена на рис.1. Периодическая секция линии состоит из участка стандартного одномодового световода SMF длиной 85 км и участка волокна DCF, компенсирующего накопленную хроматическую дисперсию. Длина участка DCF составляет 14.45 км и выбрана таким образом, чтобы средняя дисперсия секции была равна нулю. Такая линия связи представляет собой распространённый вариант системы с управляемой дисперсией. Основные параметры волоконных световодов представлены ниже.

	SMF	DCF
Потери на длине волны 1550 нм (дБ/км).	0.2	0.65
Дисперсия (пс·нм ⁻¹ ·км ⁻¹).	17	-100
Дисперсионный наклон (пс·нм ⁻² ·км ⁻¹).	0.07	-0.41
Коэффициент нелинейности (км/Вт).	1.37	5.76

Полная компенсация оптических потерь сигнала внутри секции обеспечивалась двумя эрбиевыми оптическими усилителями EDFA. Коэффициент усиления сигнала G и коэффициент шума (шум-фактор) NF каждого из усилителей составляли 13.2 и 4.5 дБ соответственно. Полное количество N секций в линии, после прохождения которых моделировалась работа приемника, варьировалось от 1 до 30.

Для передачи информации использовался формат QPSK, при котором в зависимости от передаваемых данных меняется фаза несущего оптического сигнала при неизменной амплитуде и частоте. Векторная диаграмма данного формата представлена на рис.2. При использовании для кодирования четырёх значений фазы, равноудалённых друг от друга на окружности, каждому импульсу можно сопоставить два информационных бита. Таким образом, можно либо в два раза увеличить скорость пере-

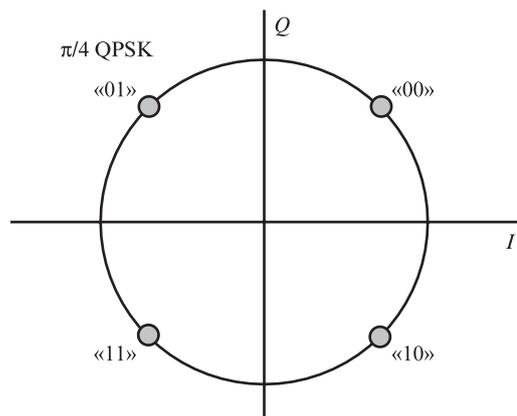


Рис.2. Векторная диаграмма формата QPSK.

дачи данных в одном спектральном канале относительно двоичных форматов при той же полосе пропускания сигнала, либо оставить скорость передачи прежней, а полосу пропускания уменьшить в два раза.

3. Описание математических моделей

Одним из основных компонентов ВОЛС является оптический передатчик, который каждый информационный символ, поступающий на его вход, преобразует в оптический импульс с определёнными характеристиками. В случае формата QPSK форма огибающей амплитуды (профиль) и частота оптического сигнала одинаковы для всех символов, а абсолютное значение фазы может принимать одно из четырёх значений – в зависимости от передаваемого символа, состоящего из пары битов. Эти пары сгруппированы в символы в соответствие с кодом Грэя, согласно которому соседние символы различаются лишь на один бит (рис.2). В расчётах использовались импульсы с профилем $A(t) = \frac{1}{2}\sqrt{P_0} [1 + \cos(2\pi t/T)]$, где P_0 – начальная пиковая мощность импульса; T – длительность одного символьного интервала; $t \in [-T/2; T/2]$. При символьной скорости 40 Гбод $T = 25$ пс. Пиковая мощность в численных расчётах составляла 1 либо 10 мВт. Эти значения были выбраны опытным путём, и они соответствуют двум режимам распространения сигнала. В первом случае искажения сигнала обусловлены в основном шумами усилителей, а во втором случае на сигнал начинают оказывать существенное влияние нелинейные эффекты. Второй случай представляет больший интерес, т.к. будущее развитие ВОЛС связано с увеличением мощности вводимого в волокно сигнала и с компенсацией нелинейных искажений на приёмнике.

Распространение светового сигнала по волоконному световоду описывается обобщённым нелинейным уравнением Шредингера для комплексной огибающей амплитуды электромагнитного поля $A(z, t)$ [20–22]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \gamma |A|^2 A = -i \frac{\alpha}{2} A. \quad (1)$$

Здесь z – расстояние вдоль волокна; t – время; β_2 – параметр дисперсии групповой скорости; β_3 – дисперсионный член третьего порядка; α – коэффициент затухания; $\gamma = k_0 n_2 / A_{\text{эф}}$ – коэффициент нелинейности; n_2 – нелинейный показатель преломления волокна; $\lambda_0 = 2\pi/k_0 = 1550$ нм – несущая длина волны; $A_{\text{эф}}$ – эффективная площадь моды во-

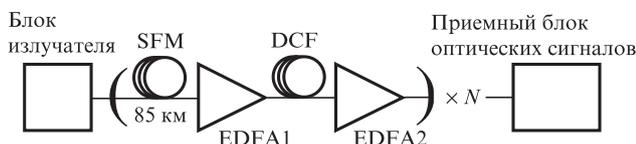


Рис.1. Схематическая конфигурация ВОЛС.

лока. Для численного решения уравнения (1) применяется метод расщепления по физическим процессам с использованием быстрого преобразования Фурье [22].

Модель волоконного эрбиевого усилителя представляет собой точечное устройство, с помощью которого амплитуду оптического сигнала умножают на коэффициент \sqrt{G} и добавляют к сигналу шумы спонтанного излучения. Для описания шумов используется модель аддитивного белого гауссова шума. Спектральная плотность белого шума вычисляется по формуле $S_{sp} = (G - 1)n_{sp}h\nu_0$, где h – постоянная Планка; ν_0 – несущая частота сигнала; n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, связанный с коэффициентом шума усилителя соотношением $NF = 2n_{sp}(G - 1)/G$.

Для фильтрации сигнала от шумов спонтанного излучения, вносимых оптическими усилителями, на приемном конце ВОЛС используется оптический фильтр, с помощью которого частотное распределение амплитуды импульса $A(\omega)$ умножается на передаточную функцию фильтра. Последняя имеет гауссову форму с единичной амплитудой на частоте $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$. В расчётах использовался фильтр с шириной на полувысоте 110 ГГц.

После оптического фильтра сигнал попадает на приёмник, который каждому принятому импульсу ставит в соответствие символ. Процедура прямого детектирования следующая: последовательно для каждого импульса в середине временного интервала T вычисляется значение фазы по формуле $\varphi = \arctan(\text{Im}A(t)/\text{Re}A(t))$; далее, согласно табл. 1, по значению фазы принимается решение о том, какому символу соответствует импульс. После этого принятая последовательность символов сравнивается с начальной последовательностью и проводится анализ ошибок.

Табл. 1. Соответствие между фазой и символами.

Фаза	Символ
$0 < \varphi < \pi/2$	«00»
$\pi/2 < \varphi < \pi$	«01»
$\pi < \varphi < 3\pi/2$	«11»
$3\pi/2 < \varphi < 2\pi$	«10»

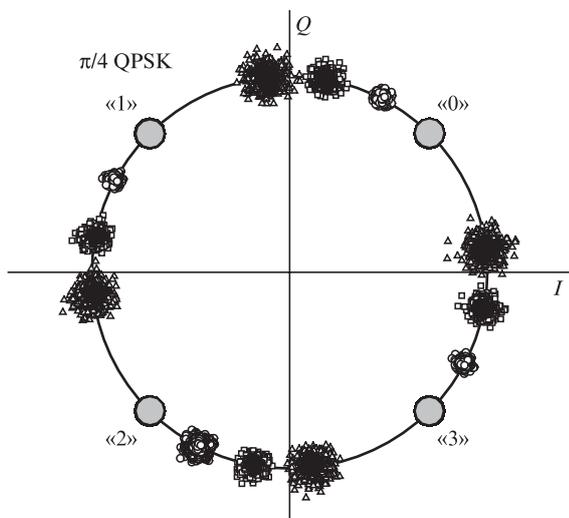


Рис.3. Векторная диаграмма формата QPSK. Серые точки – начальные фазы импульсов, кружки – фазы после первой секции, квадраты – фазы после двух секций, треугольники – фазы после трёх секций.

Шумы спонтанного излучения усилителей и нелинейные эффекты вызывают искажения формы и фазы импульсов, что приводит к появлению ошибочных символов на приёмном конце системы. Кроме того, нелинейные эффекты вызывают набег фазы, который накапливается по мере распространения сигнала по волокну. Пример сдвига фазы для трёх периодических секций линии показан на рис.3. Величина набега пропорциональна мощности сигнала и дистанции распространения, и при определённых условиях она может стать основной причиной возникновения ошибок на приёмнике. Поэтому в большинстве реальных ВОЛС применяются дифференциальные фазовые форматы, в которых для кодирования информации вместо абсолютного значения используется разность фаз между двумя последовательными импульсами. В случае же недифференциальных фазовых форматов и когерентного детектирования приходится восстанавливать значение фазы. Это может быть сделано на приёмном конце с помощью алгоритмов цифровой обработки сигнала. Следует также отметить, что объектом исследования настоящей работы является профиль амплитуды принятого сигнала, который не зависит от фазы сигнала.

4. Результаты численного моделирования

В этом разделе рассмотрены некоторые результаты численных расчётов распространения оптических импульсов по ВОЛС с использованием четырёхуровневого фазового формата модуляции. Основные параметры численных расчётов представлены ниже.

Символьная скорость (Гбод)	40
Битовая скорость (Гбит/с)	80
Длина последовательности (символы).	2^{15}
Количество точек на импульс	32
Несущая длина волны (нм)	1550
Число секций (N).	1–30
Длина секции (км)	100

Всего было выполнено 50 численных расчётов с различными начальными последовательностями символов и различными случайными реализациями шумов усилителей. Для каждого расчёта использовалась псевдослучайная последовательность длиной 2^{15} символов. После каждой периодической секции выполнялось прямое детектирование сигнала согласно модели, описанной выше. После этого результаты усреднялись по всем расчётам.

Остановимся на результатах расчётов после распространения сигнала на 1400 км. Такую дистанцию следует рассматривать отдельно по двум причинам: во-первых, она характерна для магистральных линий средней и большой протяжённости, а во-вторых, полученный коэффициент ошибки равен 10^{-3} – значению, которое близко к пороговому в случае применения схем прямой коррекции ошибок. В последовательностях символов, полученных после детектора, определялись ошибочно принятые символы, после чего выполнялся триплетный анализ, т.е. анализ троек последовательно идущих символов. Ошибка в триплете определялась ошибкой в среднем бите. Для четырёхуровневого формата используются четыре состояния фазы на векторной (точечной) диаграмме и, следовательно, четыре разных символа, поэтому существуют 64 ($4 \times 4 \times 4$) различных триплета. Поскольку каждому триплету соответствует свой собственный набор из трёх им-

пульсов, то разумно ожидать, что средний импульс каждого триплета будет иметь особые искажения в результате распространения. Однако, как оказалось, все триплеты могут быть разбиты на несколько классов, внутри которых они не различаются с точки зрения профиля фазы соответствующих им импульсов. Например, триплеты «000», «111», «222» и «333» имеют одинаковые профили фазы, сдвинутые на $\pi/2$ относительно друг друга. Результаты численных расчётов показали, что такие триплеты могут быть ошибочными с одинаковой вероятностью. В итоге можно отобрать 16 разных классов вместо исходных 64 триплетов. В табл.2 показано количество ошибочных триплетов для каждого из 16 классов после распространения сигнала на 1400 км. Общее число ошибок равно 2168, что соответствует частоте ошибок 10^{-3} .

Табл.2. Распределение ошибок по триплетам.

Класс триплетов	Количество ошибок	Процент ошибок
000&111&222&333	364	16.79
020&131&202&313	352	16.24
001&112&223&330	96	4.43
021&132&203&310	121	5.58
002&113&220&331	13	0.6
022&133&200&311	16	0.74
003&110&221&332	98	4.52
023&130&201&312	57	2.63
010&121&232&303	17	0,78
030&101&212&323	17	0.78
011&122&233&300	92	4.24
031&102&213&320	64	2.95
012&123&230&301	350	16.14
032&103&210&321	294	13.56
013&120&231&302	124	5.72
033&100&211&322	93	4.29

Из табл.2 видно, что статистика ошибок распределена по классам неравномерно. Некоторые триплеты (например, «000») вносят большой вклад в общее число ошибок, а некоторые (например, «002»), наоборот, ошибок практически не вносят. В случае, когда численные расчёты проводились для импульсов с пиковой мощностью 1 мВт, полученное распределение ошибок было практически полностью равномерным. Это объясняется тем, что для импульсов с небольшой начальной мощностью основной причиной ошибок становится шум усилителей, который одинаково искажает все импульсы. В случае импульсов с большей мощностью на первый план выходят нелинейные эффекты, которые по-разному влияют на разные последовательности импульсов, что является наглядным примером паттерн-эффекта.

Для объяснения неравномерного распределения статистики ошибок были исследованы три разных триплета: «000» как один из самых ошибочных, «002» как один из самых безошибочных и «001» как вносящий небольшое количество ошибок. Для этого был проведён отдельный расчет распространения псевдослучайной последовательности длиной 2^{15} символов по ВОЛС, конфигурация которой описана выше, на расстояние 1400 км. В этом расчёте с целью оценки степени влияния нелинейных эффектов использовалась модель усилителей без шумов. На рис.4 показаны индикаторные диаграммы профиля мощности для трёх триплетов. Видно, что для триплета «000» мощность внутреннего импульса уменьшается, тогда как мощность внешних импульсов растёт (для наглядности указана полная энергия импульсов, усреднённая по всем триплетам «000» последовательности). Для триплета «002», наоборот, наблюдается увеличение мощности внутреннего импульса и уменьшение мощности внешних импульсов.

На рис.5 представлены векторные диаграммы для тех же триплетов. Каждая точка облака на диаграммах соответствует фазе и амплитуде внутреннего импульса, вычисленным в средней точке символического интервала. По значению фазы детектор принимает решение, какому символу соответствует принятый сигнал. В данном случае любой из этих триплетов будет ошибочным, если соответствующая ему точка на диаграмме выйдет за пределы первого квадранта. Как видно из диаграмм, облако триплета «000» растянуто по окружности, тогда как облако триплета «002» – по радиусу. Этим объясняется, почему в триплете «000» ошибки случаются гораздо чаще, чем в триплете «002»: фазовое облако, растягиваясь по окружности, начинает выходить за пределы области корректного детектирования раньше, чем облако, которое растягивается по радиусу. Стоит отметить, что большинство точек облака триплета «000» находится внутри окружности. Это косвенно подтверждает, что для этого триплета средняя энергия внутреннего импульса меньше, чем у внешних импульсов. Фазовое облако триплета «001», который согласно табл.2 вносит «среднее» количество ошибок, имеет некоторое промежуточное состояние между облаками триплетов, растянутыми по окружности и по радиусу.

Проведённое математическое моделирование показывает, что с увеличением пиковой мощности (с 1 до 10 мВт) качество передачи сигнала начинает зависеть от его вида, что следует из табл.2. Поскольку неравномерная статистика ошибок ранее наблюдалась и для бинарных форматов модуляции (амплитудного в [19] и фазового в [8]), можно сделать вывод о том, что данное явление сохраняется и для форматов с большей спектральной эффективностью.

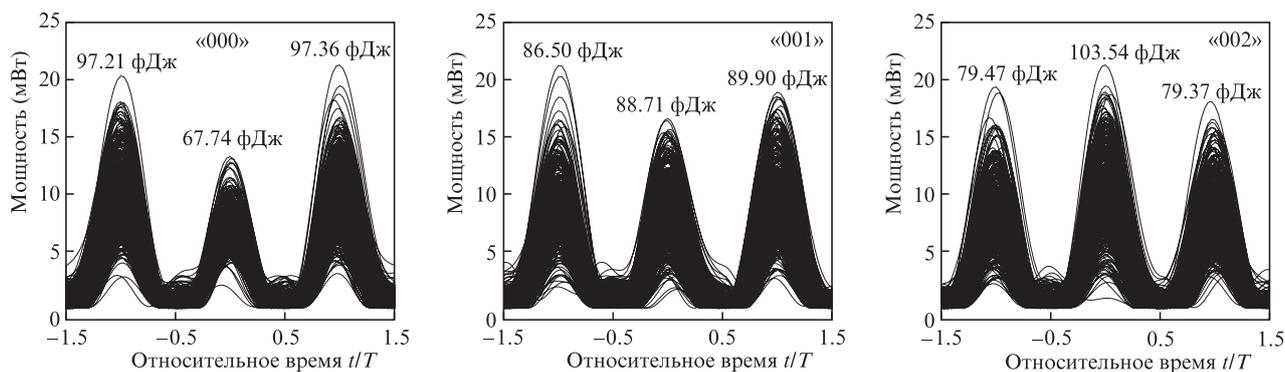


Рис.4. Индикаторные диаграммы профиля мощности импульсов для триплетов «000», «001» и «002».

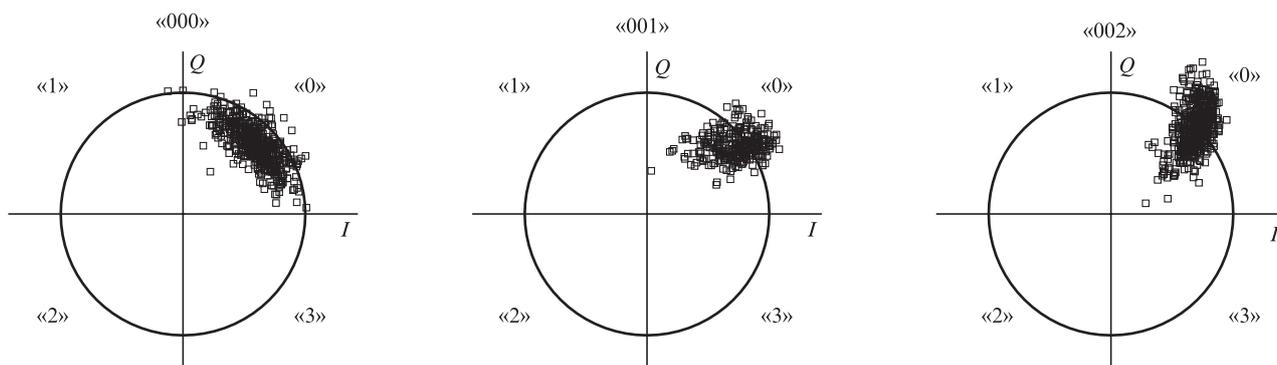


Рис.5. Векторные диаграммы для триплетов «000», «001» и «002».

ностью, чем бинарные. Наличие такой статистики позволяет учесть её в методах кодирования информации, разработанных в последние годы и ориентированных именно на работу в оптических каналах связи [10, 11, 15]. Информацию такого типа также можно применить при разработке детекторов сигнала, которые будут учитывать не только значение фазы сигнала на фазовой плоскости, но и сопутствующие вторичные величины, например амплитуду распознаваемого импульса относительно соседних (см. рис.4).

5. Выводы

Выполнено математическое моделирование передачи информации по ВОЛС со скоростью 80 Гбит/с (40 Гбод) в одном спектральном канале с помощью оптических импульсов с использованием четырёхуровневого фазового формата модуляции. На основе прямого детектирования оптического сигнала проведён анализ статистики ошибок и выявлено неравномерное распределение ошибочных символов по различным триплетам. Исследовано влияние нелинейных эффектов на профиль оптических импульсов и определена зависимость формы искажений импульса от вида соседних импульсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке госконтрактов № 11.519.11.4018 и 11.519.11.4001.

1. Nagayama K., Saitoh T., Kakui M. *Proc. OFC* (Anaheim, 2002).
2. Winzer P.J., Essiambre R.-J. *Proc. IEEE*, **94**, 952 (2006).

3. Okoshi T., Kikuchi K. *Coherent Optical Fiber Communications* (Tokyo: KTK, 1988).
4. Derr F. *Electron. Lett.*, **27** (23), 2177 (1991).
5. Settembre M., Matera F., Hagele V., et al. *J. Lightwave Technol.*, **15** (6), 962 (1997).
6. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Electron. Lett.*, **37** (19), 1179 (2001).
7. Shafarenko A., Turitsyn K.S., Turitsyn S.K. *IEEE Trans. Commun.*, **55** (2), 237 (2007).
8. Turitsyn S.K., Fedoruk M.P., Shtyrina O.V., et al. *Opt. Commun.*, **277** (2), 264 (2007).
9. Slater B., Boscolo S., Shafarenko A., Turitsyn S.K. *J. Opt. Networking*, **6** (8), 984 (2007).
10. Skidin A., Redyuk A., Shtyrina O., et al. *Opt. Commun.*, **284** (19), 4695 (2011).
11. Shafarenko A., Skidin A., Turitsyn S.K. *IEEE Trans. Commun.*, **58** (10), 2845 (2010).
12. Essiambre R.-J., Mikkelsen B., Raybon G. *Electron. Lett.*, **35** (18), 1576 (1999).
13. Mamyshev P.V., Mamysheva N.A. *Opt. Lett.*, **24** (21), 1445 (1999).
14. Shake I., Takara H., Mori K., et al. *Electron. Lett.*, **34** (16), 1600 (1998).
15. Rao V.S., Djordjevic I.B., Vasic B. *IEE Proc. Optoelectron.*, **153** (2), 87 (2005).
16. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K., Shafarenko A. *IEEE PTL*, **15** (10), 1473 (2003).
17. Qian D. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Los Angeles, 2011).
18. Yu J. et al. *Proc. OFC/NFOEC* (Los Angeles, 2011).
19. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. *Electron. Lett.*, **40** (22), 1436 (2004).
20. Hasegawa A., Tappert F. *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 142 (1973).
21. Захаров В.Е., Шабат А.Т. *ЖЭТФ*, **61** (1), 118 (1971).
22. Агравал Г.П. *Нелинейная оптика* (М.: Мир, 1996).