

# Математическое моделирование экспериментального прототипа высокоскоростной линии связи на основе дифференциального фазового формата модуляции без возвращения к нулю

А.А.Редюк, О.В.Штырина, О.Е.Наний, Ю.А.Капин, Е.А.Сачалин, Э.Б.Титов, В.Н.Трещиков, А.А.Ярышкин, М.П.Федорук

*Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования влияния хроматической дисперсии, мощности оптического излучения и нелинейных искажений в волоконно-оптической линии связи на качество передачи информации в дифференциальном фазовом формате модуляции без возвращения к нулю (NRZ DPSK) со скоростью 40 Гбит/с в одном спектральном канале. Результаты прямых численных расчетов и оценок на основе параметра качества (Q-фактор) находятся в качественном соответствии с экспериментальными данными. Экспериментально обнаружено, что зависимость коэффициента ошибки от накопленной дисперсии имеет вид «полочки» для накопленной дисперсии от –50 до 50 пс/нм; аналогичная зависимость получена в численном расчете на основе «токового» Q-фактора. Оптимальное расчетное значение мощности, вводимой в каждую из 10 секций линии общей длиной 1000 км, составило 2–4 дБм, что соответствует экспериментальному значению 3 дБм.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптическая линия связи, математическое моделирование, коэффициент битовой ошибки, дифференциальный фазовый формат модуляции.

## 1. Введение

В настоящее время при передаче оптических сигналов по волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) в подавляющем большинстве случаев для кодирования информации используется стандартный двоичный амплитудный формат модуляции «включено–выключено» (RZ OOK). В этом формате логическая единица кодируется наличием импульса, а логический ноль – его отсутствием. Последние несколько лет внимание исследователей было обращено на возможность кодирования информации с помощью разности оптических фаз несущих импульсов (DPSK) [1]. В этом случае данные кодируются по разности оптических фаз между соседними импульсами: логическая единица кодируется сдвигом на  $\pi$  фазы оптического импульса текущего бита относительно предыдущего бита, а логическому нулю соответствует одинаковая фаза в двух соседних битах. Исследования данного формата в ряде работ показали, что DPSK значительно улучшает качество передачи информации в ВОЛС большой протяженности по сравнению со стандартным форматом кодирования OOK [2, 3].

Наиболее широко в настоящее время используются системы связи со скоростью передачи данных 10 Гбит/с

на один спектральный канал и меньше. Дальнейшее развитие современных систем передачи информации так или иначе связано с увеличением дальности и объема передаваемой информации. Одним из способов увеличения ее объема является рост скорости передачи данных в одном спектральном канале. При увеличении скорости от 10 до 40 Гбит/с на передачу данных начинают оказывать влияние факторы, воздействие которых раньше было незначительным. К таким факторам относятся поляризационная модовая дисперсия и нелинейные эффекты. Последние имеют различную природу и могут являться причиной паттерн-эффекта [4]. В настоящее время ведутся активные исследования в области компенсации дисперсии и уменьшения влияния нелинейных эффектов для скоростей передачи информации 40 Гбит/с и выше [5].

Настоящая статья посвящена математическому моделированию и лабораторному исследованию передачи оптических сигналов по ВОЛС со скоростью 40 Гбит/с в одном спектральном канале с использованием модуляционного формата с кодированием по разности оптических фаз. Цель работы – математическое моделирование экспериментальной линии связи и сравнение результатов численных расчетов с данными лабораторных экспериментов, в которых исследовалась зависимость коэффициента ошибки от накопленной дисперсии и средней мощности сигнала. Экспериментальная линия связи, рассматриваемая в статье, недавно прошла успешное тестирование в российской компании ООО «Т8». Параметры линии связи выбраны такими, чтобы соответствовать наиболее сложным линиям российских операторов связи как по длине участков усиления сигнала, так и по общей протяженности линии.

## 2. Результаты лабораторных экспериментов

Перед непосредственной инсталляцией ВОЛС необходимо провести предварительные физические эксперименты и численные расчеты. С помощью лабораторных экспе-

А.А.Редюк, О.В.Штырина. Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. акад. Лаврентьева, 6; e-mail: alexey.redyuk@gmail.com, olya.shtyrina@gmail.com

О.Е.Наний. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, ГСП-1, Воробьевы горы; e-mail: nani10@rambler.ru

Ю.А.Капин, Е.А.Сачалин, Э.Б.Титов, В.Н.Трещиков, А.А.Ярышкин. ООО «Т8», Россия, 107076 Москва, ул. Краснобогатырская, 44/1, оф. 826; e-mail: info@t8.ru

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

Поступила в редакцию 26 апреля 2011 г., после доработки – 11 августа 2011 г.

риментов исследуется множество характеристик системы, таких как чувствительность и уровень перегрузки фотоприемника, зависимость коэффициента битовой ошибки (BER) от отношения сигнал/шум (OSNR) и другие. При помощи математического моделирования и численных расчетов часто удается решать задачи, связанные с нахождением оптимальных параметров оптической системы с точки зрения минимизации количества ошибок.

**2.1. Линия back-to-back**

Линия back-to-back – это простейшая конфигурация ВОЛС, основными элементами которой являются оптический передатчик, оптический усилитель как источник шума и оптический приемник. Схема экспериментальной установки приведена на рис.1.

Линия состоит из измерителя коэффициента битовых ошибок BER на скорости 10 Гбит/с; блока TP-10-FEC, осуществляющего кодирование и декодирование сигнала на скорости 10 Гбит/с и коррекцию ошибок; агрегирующего транспондера TP-40G, формирующего оптический сигнал со скоростью 43.7 Гбит/с из четырех потоков с частотой 10 Гбит/с и выполняющего обратные функции на приеме; эрбиевых волоконных оптических усилителей EDFA; переменных и фиксированных аттенуаторов; спектральных мультиплексоров DWDM, выполняющих роль оптических фильтров; переменного компенсатора дисперсии Teraxion.

Для данной линии были проведены лабораторные эксперименты по передаче битового потока со скоростью 40 Гбит/с в одном спектральном канале с использованием формата модуляции NRZ DPSK. Накопленная в конце линии дисперсия варьировалась с помощью переменного компенсатора дисперсии. В результате для фиксированного значения OSNR = 8.08 дБ была получена зависимость BER от накопленной дисперсии, представленная на рис.2.

Отметим, что кривая имеет вид «полочки»: для накопленной дисперсии от -50 до 50 пс/нм BER изменяется в узком диапазоне. Это можно объяснить тем, что при детектировании сигнала на приемнике усреднение во временной области выполнялось по интервалу, длительность которого меньше ширины битового интервала. Поэтому небольшое уширение и пересечение соседних оптических импульсов, происходящее при малой ненулевой дисперсии, не влияет на качество детектирования битов.

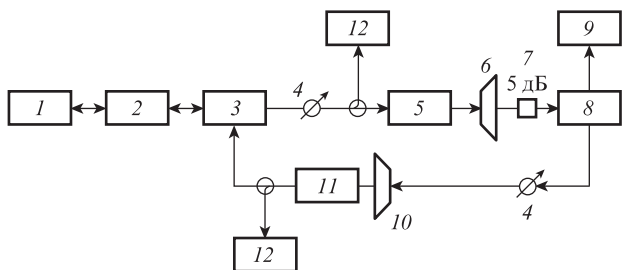


Рис.1. Схема экспериментальной установки линии back-to-back: 1 – измеритель коэффициента битовых ошибок; 2 – блок TP-10-FEC; 3 – транспондер TP-40G; 4, 7 – переменные и фиксированный аттенуаторы; 5, 8 – эрбиевые волоконные усилители EDFA-1 и EDFA-2; 6, 10 – спектральные мультиплексоры; 9 – оптический спектроанализатор; 11 – переменный компенсатор дисперсии Teraxion; 12 – измеритель оптической мощности.

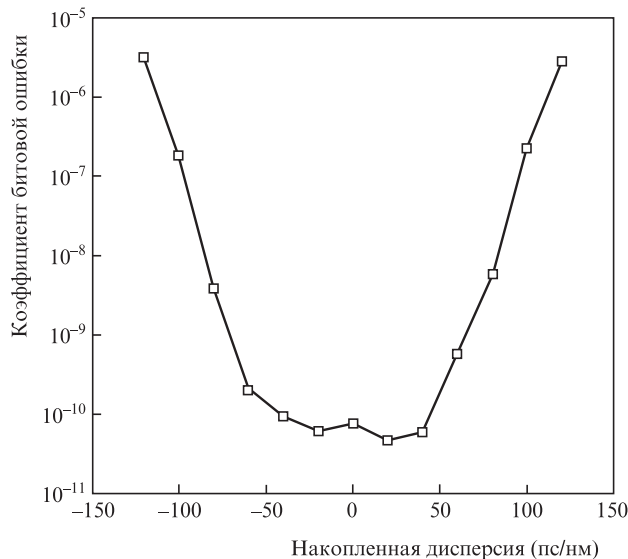


Рис.2. Экспериментальная зависимость BER от накопленной дисперсии для линии back-to-back при OSNR = 8.08 дБ и мощности сигнала на приемнике 2.2 дБм.

**2.2. Основная линия**

Основной целью экспериментальных исследований является разработка и внедрение ВОЛС общей длиной 1000 км на основе одномодового волоконного световода (ОВС) для передачи информации со скоростью 40 Гбит/с в одном спектральном канале с использованием формата модуляции NRZ DPSK. Принципиальная схема исследуемой ВОЛС показана на рис.3.

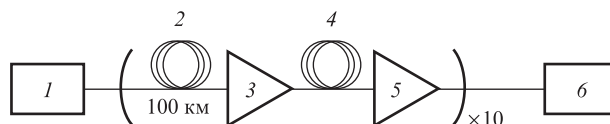


Рис.3. Схематическая конфигурация ВОЛС: 1 – блок излучателя; 2 – ОВС; 3, 5 – усилители EDFA-1 и EDFA-2; 4 – волоконный компенсатор дисперсии; 6 – приемный блок оптических сигналов.

Периодическая секция линии состоит из одного участка ОВС длиной 100 км, двух эрбиевых оптических усилителей (EDFA-1 и EDFA-2), отрезка волокна, компенсирующего дисперсию, а также блоков излучателя и приемника оптических сигналов. Эта схема представляет собой простейший вариант системы с управляемой дисперсией. В качестве носителей информации в таких линиях можно использовать дисперсионно-управляемые солитоны [6, 7]. Полностью линия состоит из 10 секций. Волоконные эрбиевые усилители EDFA-1 и EDFA-2 компенсируют оптические потери сигнала внутри секции. Для уменьшения коэффициента ошибки используется схема коррекции ошибок FEC.

На данный момент с основной ВОЛС был проведен эксперимент, результаты которого позволяют утверждать, что при петлевом тесте на выходном приемнике оптической линии длиной 1000 км не было зарегистрировано ошибок в течение 36 часов непрерывной передачи битового потока, что соответствует BER < 5 × 10<sup>-15</sup>. При этом мощность излучения, вводимого в ОВС, составляла 3 дБм.

### 3. Описание математических моделей

Распространение сигнала вдоль оптического волокна описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера для комплексной огибающей  $A(z, t)$  амплитуды электромагнитного поля:

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

Здесь  $z$  – расстояние вдоль волокна;  $t$  – время;  $\beta_2$  – параметр дисперсии групповой скорости;  $\beta_3$  – дисперсионный член третьего порядка;  $\alpha$  – коэффициент затухания;  $\gamma = 2\pi n_2 / (\lambda_0 A_{\text{eff}})$  – коэффициент нелинейности;  $n_2$  – нелинейный показатель преломления волокна;  $\lambda_0 = 1550$  нм – несущая длина волны;  $A_{\text{eff}}$  – эффективная площадь моды волокна. Параметры волоконных световодов, используемых в численных расчетах, представлены ниже.

	SMF	DCF
Потери на длине волны 1550 нм (дБ/км) . . . . .	0.2	0.65
Дисперсия (пс·нм <sup>-1</sup> ·км <sup>-1</sup> ) . . . . .	17	-100
Дисперсионный наклон (пс·нм <sup>-2</sup> ·км <sup>-1</sup> ) . . . . .	0.07	-0.41
Коэффициент нелинейности (км/Вт) . . . . .	1.2	5.76

Для численного решения уравнения (1) использовался метод расщепления по физическим процессам [8].

Волоконный эрбиевый усилитель моделируется как точечное устройство, умножающее амплитуду оптического сигнала на  $\sqrt{G}$  ( $G$  – коэффициент усиления сигнала в усилителе) и добавляющее к сигналу шумы спонтанной эмиссии. Для описания шумов используется модель аддитивного белого шума. Спектральная плотность белого шума вычисляется по формуле  $S = (G - 1)n_{\text{sp}}/h\nu_0$ , где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu_0$  – несущая частота сигнала;  $n_{\text{sp}}$  – коэффициент спонтанной эмиссии, связанный с коэффициентом шума усилителя NF соотношением  $NF = 2n_{\text{sp}}(G - 1)/G$ . При расчетах коэффициент шума волоконного эрбиевого усилителя  $NF = 4.5$  дБ.

Оптический фильтр используется для фильтрации сигнала от шумов спонтанной эмиссии, вносимых оптическим усилителем. Его принцип действия основан на умножении в фурье-пространстве распределения амплитуды импульса  $A(\omega)$  на передаточную функцию фильтра. Эта функция имеет гауссову форму с единичной амплитудой на несущей частоте  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$  и шириной на полувысоте  $B_{\text{опт}}$ .

Переменный компенсатор дисперсии моделируется как линейное точечное устройство, увеличивающее или уменьшающее накопленную хроматическую дисперсию.

Математической моделью оптического приемника является «идеальный» приемник, принимающий оптический сигнал любой необходимой мощности и преобразующий его в ток по правилу  $\Delta = I_0 - I_1$ , где  $I_0 = \frac{1}{2} |A_n + A_{n-1}|^2$  – ток нулей,  $I_1 = \frac{1}{2} |A_n - A_{n-1}|^2$  – ток единиц;  $n$  – номер битового интервала. После этого электрический сигнал проходит через электрический фильтр Баттерворта 3-го порядка с полосой пропускания  $B_{\text{эл}}$  и попадает на устройство, выполняющее непосредственное детектирование битов. Правило детектирования следующее: при  $\Delta > 0$  детектируется 0, а при  $\Delta < 0$  детектируется 1. При математическом моделировании схемы коррекции ошибок не использовались.

### 4. Q-фактор

Оценкой качества работы любой коммуникационной системы является коэффициент ошибки, который определяется как отношение числа ошибочно принятых битов к общему числу переданных [9]. В настоящее время минимально допустимым значением коэффициента считается  $BER = 10^{-9}$ , что соответствует одному ошибочно принятому биту при передаче  $10^9$  битов. В типичных численных расчетах из-за ограниченности ресурсов применяются последовательности длиной в тысячи битов. Однако этого недостаточно для прямого моделирования малых значений BER, и для его оценки используются различные непрямые методы, основанные на статистическом анализе флуктуаций формы принятого сигнала.

В случае формата передачи данных DPSK в предположении, что статистика токов нулевых и единичных битов на приемнике подчиняется нормальному гауссову распределению, для оценки BER используется модель «токового» Q-фактора, который определяется следующим образом [2, 10–12]:

$$Q_{\text{el}} = \frac{|\mu_0 - \mu_1|}{\sigma_0 + \sigma_1},$$

где  $\mu_i, \sigma_i$  ( $i = 0, 1$ ) – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение разности токов  $\Delta = I_0 - I_1$  для нулевых и единичных битов соответственно. Фактор  $Q_{\text{el}}$  связан с коэффициентом ошибки соотношением

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q_{\text{el}}}{\sqrt{2}} \right). \quad (2)$$

Следует отметить, что  $Q_{\text{el}}$ -фактор не дает точной оценки качества линии связи, однако его максимум позволяет определить набор параметров оптической системы и сигнала, оптимальных с точки зрения минимизации количества ошибок.

## 5. Результаты численного моделирования

### 5.1. Линия back-to-back

На рис.4 схематически представлена модель, которая использовалась для численных расчетов распространения оптических импульсов вдоль линии back-to-back. В вычислениях применялись псевдослучайные последовательности длиной  $2^{16} - 1$  бит. Длительность битового интервала составляла 25 пс, что соответствует скорости передачи 40 Гбит/с. Начальная средняя мощность сигнала была равна 6 дБм. Для данных расчетов мощность шума выбиралась такой, чтобы на приемнике отношение OSNR было относительно мало и была возможность выполнить прямой счет ошибок. Ширина оптического фильтра  $B_{\text{опт}}$ , взятая из экспериментальных данных, составляла 100 ГГц.

На рис.5 показаны зависимости BER от накопленной дисперсии, полученные с помощью прямого счета оши-

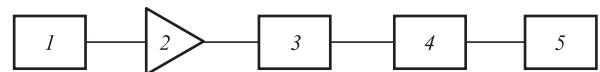


Рис.4. Модель линии back-to-back для численного счета: 1 – блок излучателя; 2 – усилитель EDFA; 3 – переменный компенсатор дисперсии Teraxion; 4 – полосовой фильтр; 5 – приемный блок оптических сигналов.

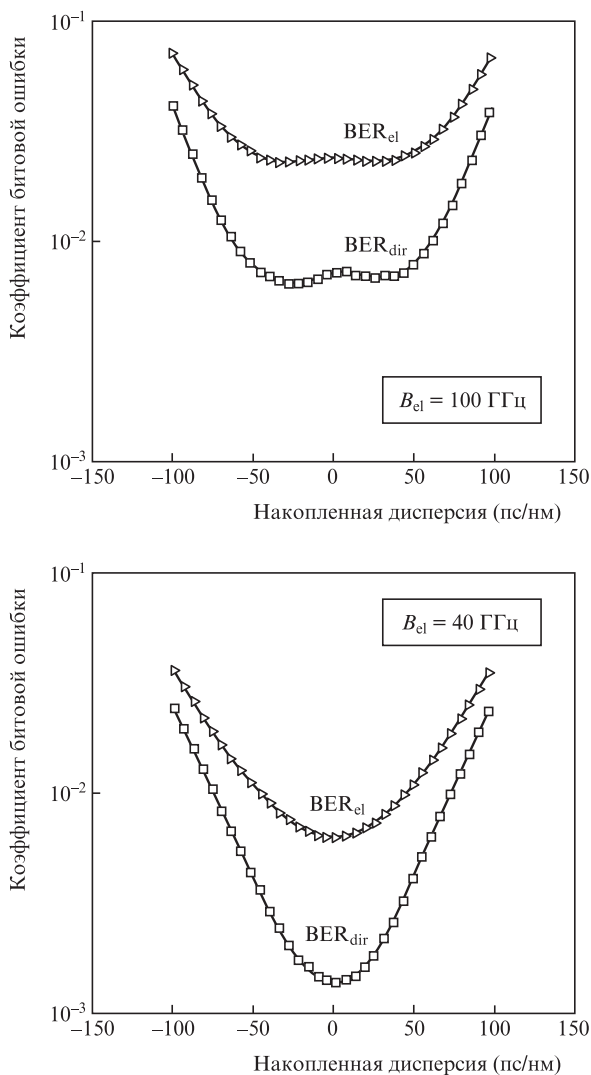


Рис.5. Зависимости BER от накопленной дисперсии при различных  $B_{el}$ .

бок ( $BER_{dir}$ ) и  $Q_{el}$ -фактора ( $BER_{el}$ ). Видно, что при  $B_{el} = 100$  ГГц кривые, как и в эксперименте, имеют вид «полочки». При данной ширине электрического фильтра усреднение выполняется по интервалу 10 пс, и небольшое пересечение соседних импульсов не увеличивает числа ошибочно принятых битов. Видно также, что численная оценка BER, полученная с помощью токового  $Q$  фактора, не совпадает количественно с результатом прямого счета. Это расхождение обусловлено приближенностью модели белого гауссова шума.

Известно, что электрический фильтр приемника влияет на качество детектирования сигнала, а ширина фильтра 40 ГГц является оптимальной при скорости передачи информации 40 Гбит/с [13]. Из рис.5 видно, что при  $B_{el} = 40$  ГГц кривые  $BER_{dir}$  и  $BER_{el}$  имеют только один минимум, соответствующий нулевой накопленной дисперсии, когда импульсы не уширяются.

5.2. Основная линия

Рассмотрим результаты численных расчетов для основной разрабатываемой ВОЛС. Длина участка DCF задавалась средней дисперсией секции и определялась из следующего соотношения:

$$\langle D \rangle = \frac{D_{SMF}L_{SMF} + D_{DCF}L_{DCF}}{L_{SMF} + L_{DCF}},$$

где  $D_{SMF}$  и  $D_{DCF}$  – хроматические дисперсии волокон SMF и DCF, а  $L_{SMF}$  и  $L_{DCF}$  – их длины. Ширина электрического фильтра  $B_{el} = 40$  ГГц.

Основным результатом расчетов является оптимизация параметров ВОЛС с целью определения области значений, при которых BER становится минимальным. В расчетах варьировались начальная средняя мощность импульса, средняя дисперсия одной периодической секции и накопленная в линии дисперсия.

На рис.6 представлены линии уровня  $Q_{el}$ -фактора в плоскости параметров начальной мощности сигнала и средней дисперсии одной секции при фиксированном значении накопленной в линии дисперсии. Отметим, что чем больше  $Q_{el}$ -фактор, тем меньше коэффициент ошибки, поэтому на диаграммах наибольший интерес представляют области с максимальными  $Q_{el}$ . Видно, что максимальные значения  $Q_{el}$ -фактора находятся в диапазоне начальной

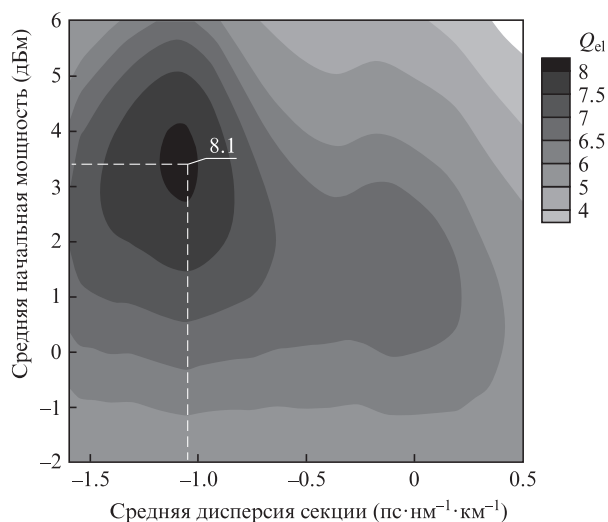


Рис.6. Линии уровня  $Q_{el}$  в плоскости параметров начальной средней мощности сигнала и средней дисперсии секции при нулевой накопленной дисперсии.

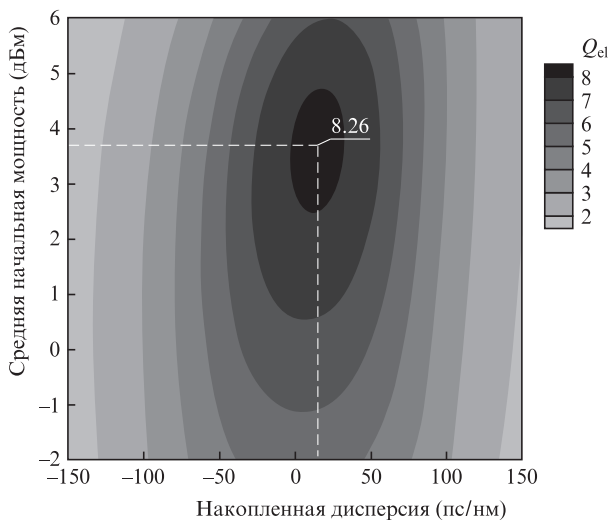


Рис.7. Линии уровня  $Q_{el}$  в плоскости параметров начальной средней мощности сигнала и накопленной дисперсии при  $\langle D \rangle = -1.1$  пс·нм<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup>.

мощности 2.5–4 дБм и отрицательной средней дисперсии секции.

На рис.7 представлены линии уровня  $Q_{cl}$  в плоскости параметров начальной мощности сигнала и накопленной дисперсии при  $\langle D \rangle = -1.1 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ . Видно, что своих максимальных значений  $Q_{cl}$  достигает при накопленной дисперсии в диапазоне 0–30 пс/нм. Максимальное значение  $Q_{cl}$  составляет 8.26, что согласно оценке (2) соответствует  $\text{BER} = 7 \times 10^{-17}$ .

## 6. Заключение

В работе выполнено математическое моделирование передачи информации в дифференциальном фазовом формате модуляции без возвращения к нулю (NRZ DPSK) со скоростью 40 Гбит/с в одном спектральном канале. Проведено сравнение с экспериментальными результатами.

Экспериментально обнаружено, что для накопленной дисперсии от –50 до 50 пс/нм зависимость от нее коэффициента ошибки имеет вид «полочки». Результаты прямых численных расчетов и оценок на основе параметра качества ( $Q$ -фактор) подтверждают этот результат при ширине электрического фильтра более 80 ГГц.

Выполнена оптимизация ВОЛС, состоящей из 10 секций общей длиной 1000 км. Данные численных расчетов показывают, что оптимальная мощность, вводимая в каждую из 10 секций линии, составляет 2–4 дБм. При этом

оптимальная средняя дисперсия секции находится в диапазоне от –1.4 до –0.9 пс·нм<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup>, что также согласуется с экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госконтрактов №02.740.11.5129 и 11.519.11.4001.

1. Winzer P.J., Essiambre R.-J. *Proc. IEEE*, **94**, 952 (2006).
2. Штырина О.В., Якасов А.В., Латкин А.И., Турицын С.К., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **37** (6), 584 (2007).
3. Штырина О.В., Федорук М.П., Турицын С.К. *Квантовая электроника*, **37** (9), 885 (2007).
4. Turitsyn S.K., Fedoruk M.P., Shtyrina O.V., Yakasov A.V., Shafarenko A., Desbruslais S.R., Reynolds K., Webb R. *Opt. Commun.*, **277** (2), 264 (2007).
5. Slater B., Boscolo S., Shafarenko A., Turitsyn S.K. *J. Opt. Network.*, **6** (8), 984 (2007).
6. Turitsyn S.K., Mezentsev V.K., Shapiro E.G. *Opt. Fiber Technol.*, **4** (4), 384 (1998).
7. Turitsyn S.K., Shapiro E.G. *Opt. Fiber Technol.*, **4** (2), 151 (1998).
8. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996).
9. Agrawal G.P. *Fiber-Optic Communication Systems* (New York: John Wiley & Sons Inc., 1997).
10. Slater B., Boscolo S., Broderick T., Turitsyn S.K., Freund R., Molle L., Caspar C., Schwartz J., Barnes S. *Opt. Express*, **15** (17), 10999 (2007).
11. Slater B., Boscolo S., Mezentsev V.K., Turitsyn S.K. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **19** (8), 607 (2007).
12. Wei X., Liu X., Xu C. *IEEE Phot. Techn. Lett.*, **15** (11), 1636 (2003).
13. Laedke E.W., Goder N., Schaefer T.Y., Spatschek K.H., Turitsyn S. *Electron. Lett.*, **35** (24), 2131 (1999).