

На правах рукописи



Редюк Алексей Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
ЛИНИЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА**

05.13.18 – «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Федорук Михаил Петрович

Официальные оппоненты: Рябко Борис Яковлевич,
доктор технических наук, профессор,
СибГУТИ, ректор

Шапиро Давид Абрамович,
доктор физико-математических наук,
профессор, ИАиЭ СО РАН,
заведующий лаборатории фотоники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
“Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова”, г. Москва

Защита состоится «1» июля 2013 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета ДМ 003.046.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «22» мая 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Лебедев А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Волоконная оптика является относительно молодым, актуальным и интенсивно развивающимся современным направлением оптической физики. Начало бурного развития данной области пришлось на конец 80-х годов прошлого века и продолжается в настоящее время. Постоянный рост объёма передаваемой информации и процессы глобализации общества стимулируют исследователей к созданию эффективного способа передачи больших массивов данных на большие расстояния. На сегодняшний день волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) являются самым эффективным средством передачи огромного объёма информации как на магистральные (~1000 км), так и на трансокеанские (~10000 км) расстояния. Суммарная пропускная способность современных высокоскоростных линий связи со спектральным уплотнением каналов может составлять порядка 10 Тбит/с при скорости передачи данных в одном частотном канале до 100 Гбит/с и дальности передачи в несколько тысяч километров.

Широкое распространение интернета, цифровых коммуникаций, технологий передачи и обработки информации в режиме реального времени обуславливает постоянный спрос на увеличение пропускной способности и дальности передачи ВОЛС, что является одной из наиболее актуальных задач. Увеличения пропускной способности можно добиться либо путём расширения используемого спектрального диапазона, либо при помощи увеличения спектральной эффективности передачи данных, определяемой как отношение скорости передачи информации в одном частотном канале к расстоянию между соседними частотными каналами. Спектральный диапазон оптических линий связи ограничен окнами прозрачности кварцевого световода, в которых сигнал имеет минимальное затухание. Увеличить спектральную эффективность можно путём использования многоуровневых методов модуляции сигнала и/или путём уменьшения расстояния между соседними частотными каналами. Однако каждый из этих способов приводит к тому, что на передачу данных начинают оказывать значительное влияние так называемые нелинейные эффекты, и искажения сигнала определяются сложным взаимодействием шумов, линейных эффектов и нелинейности. Одним из следствий такого взаимодействия является зависимость искажения сигнала от вида передаваемых данных, называемая паттерн-эффектом. Наиболее наглядным примером паттерн-эффекта является наличие битовых последовательностей, которые вносят непропорционально большой вклад в общее число ошибочно принятых битов. В этом контексте знание особенностей нелинейных искажений сигнала и статистики ошибочных битов может быть использовано современными методами коррекции ошибок для улучшения эффективности обработки передаваемого сообщения.

Стоит отметить, что современные ВОЛС являются сложными и дорогостоящими системами. Качество передачи информации по таким системам зависит от большого числа характеристик среды передачи, оптического сигнала, приёмо-передающих и усилительных устройств. Процессу ввода линии в эксплуатацию предшествуют длительные и массивные экспериментальные и численные исследования, направленные на нахождение оптимальных значений различных характеристик. Учитывая этот факт, а также всё вышеизложенное, можно сделать вывод, что математическое моделирование современных ВОЛС с использованием высокопроизводительных вычислительных комплексов является сложной и актуальной задачей.

Цели работы. Разработка инструментария для моделирования передачи информации по современным высокоскоростным волоконно-оптическим линиям связи, а также методов анализа характера искажений оптических сигналов в нелинейном режиме распространения. Создание комплекса программ, адаптированного для численного моделирования на высокопроизводительных вычислительных комплексах. Исследование влияния хроматической дисперсии, шумов усилителей и нелинейных искажений на качество передачи информации по многоканальным высокоскоростным ВОЛС.

Решаемые задачи.

1. Разработка и адаптация математических моделей, описывающих различные устройства ВОЛС, и численных методов, ориентированных на вычисления на высокопроизводительных вычислительных комплексах.
2. Разработка комплекса программ для моделирования распространения оптического сигнала по ВОЛС и статистической обработки принятого сигнала.
3. Изучение влияния паттерн-эффекта на качество передачи сигнала для различных конфигураций ВОЛС и различных методов модуляции сигнала.
4. Оптимизация ключевых параметров прототипа реальной линии связи и сравнение полученных результатов с результатами натурного эксперимента.

Объектом исследования диссертации являются параметры оптического сигнала и волоконно-оптической линии связи, в общем виде состоящей из источника оптического излучения, его модулятора, волоконного световода в качестве среды распространения сигнала, приёмника оптического излучения и анализатора сигнала.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовалось математическое моделирование, а также методы математической статистики, теории вероятности и вычислительной математики.

ки. Для описания распространения оптического сигнала по волоконному световоду использовалось нелинейное уравнение Шрёдингера. Для получения его численного решения применялся Фурье-метод расщепления по физическим процессам. Данный метод обеспечивает большую точность по сравнению с конечно-разностными схемами, но плохо поддаётся распараллеливанию. Однако статистический анализ паттерн-эффекта проводился путём усреднения результатов по многим численным расчётам с разной реализацией случайных шумов усилителей и начальных последовательностей битов. Поэтому главным приоритетом была статистическая значимость результатов. Для этого одновременно осуществлялось множество параллельно исполняющихся расчётов с разными начальными данными, результаты которых централизованно обрабатывались общей процедурой.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие трём пунктам паспорта специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по физико-математическим наукам:

1. Проведён сравнительный анализ режимов распространения оптических импульсов по волоконному световоду. Для каждого из режимов получена оценка величины шага по пространственной переменной, необходимого для численного решения нелинейного уравнения Шрёдингера методом расщепления по физическим процессам.

2. Создан комплекс программ, предназначенный для моделирования оптических волоконных систем, включающих модели среды передачи, приёмо-передающих и усилительных устройств, и изучения статистических свойств цифровых сигналов в нелинейных режимах распространения.

3. С использованием созданных программ и алгоритмов выполнено исследование статистики ошибочно принятых битов для различных конфигураций ВОЛС и различных методов модуляции сигнала. Полученные закономерности зависят от метода модуляции сигнала и обусловлены межсимвольными взаимодействиями.

4. С помощью прямого счёта статистики ошибок и оценок на основе параметра качества (Q-фактор) установлено, что для дифференциального фазового метода кодирования без возвращения к нулю качество детектирования устойчиво к отклонению накопленной дисперсии от нулевого значения, что подтверждается результатами натурного эксперимента.

5. По результатам численного моделирования экспериментального прототипа ВОЛС, состоящей из 10 секций общей длиной 1000 км и использующей дифференциальный фазовый метод кодирования без возвращения к нулю для передачи данных со скоростью 40 Гбит/с в одном

спектральном канале, определены оптимальные значения мощности вводимого в волокно излучения, средней дисперсии секции и накопленной дисперсии линии.

Научная новизна изложенных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Впервые проведён подробный теоретический анализ режимов распространения оптических импульсов по волоконному световоду, а также на основе численных расчётов для каждого из режимов получены оценки величины шага по пространственной переменной, необходимого для численного решения нелинейного уравнения Шрёдингера.

2. Впервые проведён анализ паттерн-эффекта как с точки зрения его информационного проявления, так и с точки зрения физических причин его возникновения для высокоскоростных линий связи различной конфигурации и различных методов модуляции.

3. Определены параметры (мощность сигнала, средняя дисперсия секции, накопленная дисперсия) экспериментального прототипа ВОЛС, минимизирующие количество ошибок на приёмном конце.

4. Создан комплекс программ на основе эффективных численных методов для моделирования оптических волоконных систем, ориентированный на изучение статистических свойств цифровых сигналов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанная методика статистической обработки принятого сигнала позволяет использовать адаптивные коды с ограничениями в совокупности со схемами коррекции ошибок для улучшения качества передачи информации. Разработанный комплекс программ, адаптированный для расчётов на высокопроизводительных вычислительных комплексах, позволяет проводить численное моделирование современных волоконно-оптических линий связи. Вычисленные оптимальные значения параметров экспериментального прототипа ВОЛС могут быть использованы при её будущем проектировании.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении государственного контракта № 02.740.11.5129 «Использование спектрально-эффективных методов модуляции сигнала и специальных методов помехоустойчивого кодирования для повышения пропускной способности магистральных волоконно-оптических линий связи» от 9 марта 2010 г. (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»). В настоящее время продолжение исследований в направлении диссертационной работы поддержано государственными контрактами № 11.519.11.4001 от 18 августа 2011 г. и № 11.519.11.4018 от 21 октября 2011 г. (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»).

Обоснованность и достоверность основных результатов, полученных в диссертации, основывается на согласованности результатов проведённых тестовых расчётов с экспериментальными данными, известными аналитическими решениями, а также с численными результатами, полученными другими авторами.

Представление работы. Основные результаты диссертации обсуждались на объединённом научном семинаре ИВТ СО РАН «Информационно-вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)» под руководством академика РАН Ю.И. Шокина и профессора В.М. Ковени, а также были представлены на шести всероссийских и международных научных конференциях: Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2007); Российский семинар по волоконным лазерам (Ульяновск, 2010; Новосибирск, 2012); International Conference on Automation, Control and Information Technology — Information and Communication Technology (Novosibirsk, 2010); II-й Российско-британский семинар «Потоковая обработка данных и программирование» (Новосибирск, 2011); III-я Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, 2011).

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК в качестве изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание учёной степени кандидата и доктора наук, 4 — в трудах международных и всероссийских конференций, 1 — в тезисах всероссийской конференции. На комплекс программ, разработанный за время работы над диссертацией, получено свидетельство о государственной регистрации программы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

Личный вклад автора. Проведённое в работе исследование является самостоятельным авторским исследованием. Во всех совместных работах личный вклад автора заключается в обсуждении постановок задач, создании и тестировании алгоритмов и компьютерных программ, проведении численных экспериментов с использованием разработанных программ, анализе точности и интерпретации результатов численного моделирования. Все результаты в перечисленных публикациях, связанные с математическим моделированием ВОЛС, выполнением численных расчётов, анализом статистики ошибочно принятых битов, получены автором лично.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы из 110 наименований. Объём диссертации составляет 148 страниц, включая 28 таблиц, 61 рисунок и 1 приложение.

Содержание работы

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы исследования, сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, перечислены положения, выносимые на защиту, а также приведено краткое содержание диссертации по главам.

В главе 1 представлен краткий обзор литературы по теме работы, описаны физические и математические модели и алгоритмы, применяемые при численном моделировании передачи данных по ВОЛС со спектральным уплотнением каналов, введено понятие паттерн-эффекта в оптической связи.

В параграфе 1.1 приведено краткое описание истории развития волоконной оптики и выделены ключевые этапы эволюции оптической связи. Представлена оценка эффективности волоконно-оптических линий связи по сравнению с другими системами передачи информации.

Параграф 1.2 посвящён основным технологиям, применяемым в оптической связи. Описаны преимущества использования волоконного световода в качестве среды распространения оптических импульсов, а также дано описание принципа действия технологии спектрального уплотнения каналов. Изложены существующие способы компенсации оптических потерь сигнала с помощью распределённых и точечных волоконных усилителей. Вводится понятие спектральной эффективности передачи данных γ , под которым понимается отношение скорости передачи данных B в одном частотном канале к расстоянию между соседними частотными каналами $\delta\nu$.

В параграфе 1.3 вводится понятие паттерн-эффекта в волоконно-оптических линиях связи, который проявляется в виде зависимости количества ошибок при передаче информации от вида самой информации. Проводится анализ факторов, приводящих к появлению паттерн-эффекта.

Параграф 1.4 посвящён математическим моделям и численным методам, используемым при численном моделировании передачи информации по ВОЛС. Основной моделью, применяемой для описания распространения оптических импульсов вдоль волоконного световода, является нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ) для медленно меняющейся комплексной огибающей амплитуды электромагнитного поля $A(z, t)$ [1, 2]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + i\alpha A - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + \gamma |A|^2 A = 0, \quad (1)$$

где z — расстояние вдоль линии, t — время, $|A|^2$ — мощность, β_2 — параметр дисперсии групповой скорости, β_3 — дисперсионный член третьего порядка, α — коэффициент затухания, γ — коэффициент керровской

нелинейности. Коэффициент γ определяется формулой $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda_0 A_{eff}}$, где n_2 — нелинейный показатель преломления, λ_0 — несущая длина волны, A_{eff} — эффективная площадь собственной моды световода.

Для численного решения НУШ использовался симметричный Фурье-метод расщепления по физическим процессам [3], имеющий второй порядок точности по шагу h пространственной переменной z .

Общепринятой оценкой качества любой системы связи является величина коэффициента ошибки BER (Bit-Error Rate), которая определяется как отношение количества ошибочно принятых битов к общему числу переданных битов.

Прямое вычисление коэффициента ошибки заключается в непосредственном моделировании работы оптического приёмника и сравнении исходной и принятой последовательности битов. Однако прямое численное моделирование очень низких значений BER ($< 10^{-6}$) невозможно даже при использовании современных суперкомпьютеров. В этом случае очень важную роль приобретают непрямые статистические и численные методы оценки BER , основанные на модели Q-фактора [4]. Для амплитудного двоичного метода «включено-выключено» (ОК — On-Off Keying) Q-фактор определяется выражением $Q = (I_1 - I_0)/(\sigma_1 + \sigma_0)$, где I_1 и I_0 — средние значения тока для битов «1» и «0», а σ_1 и σ_0 , соответственно, среднеквадратичные отклонения. Связь коэффициента ошибки BER и Q-фактора описывается следующим простым выражением:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (2)$$

где $\operatorname{erfc}(x)$ — дополнительная функция ошибок.

В главе 2 представлен сравнительный анализ режимов распространения оптических импульсов по волоконному световоду и приведены результаты исследования сходимости численного решения НУШ, полученного Фурье-методом расщепления по физическим процессам. Представлена методика проведения численных расчётов и описана структура и назначение разработанного комплекса программ.

В параграфе 2.1 исследуется нелинейное уравнение Шрёдингера. Вводится понятие дисперсионной длины L_D и нелинейной длины L_N [5]:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|}, \quad L_N = \frac{1}{\gamma P_0}, \quad (3)$$

где T_0 — длительность импульса, P_0 — пиковая мощность импульса. L_D и L_N являются характерными длинами, на которых дисперсионные и нелинейные эффекты становятся существенными при распространении импульса вдоль волокна. В зависимости от соотношений между L_D , L_N

и длиной волокна L выделяется девять режимов распространения импульсов.

В параграфе 2.2 даётся качественное описание каждого из режимов распространения и приводятся результаты тестовых численных расчётов, целью которых является определение зависимости точности счёта от длины шага h по пространственной переменной z . Для каждого из режимов показана сходимость численного решения со вторым порядком точности при уменьшении длины шага h и сформулировано правило выбора h (таблица 1).

Таблица 1 — Правило выбора шага по z при численном решении НУШ

Режим распространения	Шаг по z
1. $L_D, L_N \gg L$	$dz = L$
2. $L_D \leq L \ll L_N$	$dz = L_D$
3. $L_D \gg L \geq L_N$	$dz = L_N/15$
4.1 $L_D \ll L \sim L_N$	$dz = L_D/5$
4.2 $L_D \sim L \sim L_N$	$dz = \min\{L, L_D, L_N\}/15$
4.3 $L_D \sim L \gg L_N$	$dz = L_N/1000$
4.4 $L_D \ll L_N \ll L$	$dz = L_D/5$
4.5 $L_D \sim L_N \ll L$	$dz = \min\{L_D, L_N\}/300$
4.6 $L_N \ll L_D \ll L$	$dz \ll L_N$

В параграфе 2.3 приведена методика проведения численных экспериментов, состоящих из объёмных кластерных вычислений и локальной обработки данных. Представлена структура и назначение созданного комплекса программ, адаптированного для численного моделирования на высокопроизводительных вычислительных комплексах.

Глава 3 посвящена математическому моделированию передачи информации по многоканальной высокоскоростной линии связи с амплитудным методом модуляции сигнала.

В параграфе 3.1 излагается постановка задачи и описывается конфигурация волоконно-оптической линии связи. Линия состоит из пяти спектральных каналов с расстоянием 100 ГГц между соседними каналами. Кодирование информации осуществляется с помощью амплитудного метода модуляции с возвращением к нулю (RZ OOK) со скоростью 40 Гбит/с в одном спектральном канале.

В параграфе 3.2 представлены результаты прямого счёта статистики ошибок. Численные расчёты проведены для дистанций распространения сигнала от 2500 км до 11000 км. Кроме того, для подтверждения статистической значимости результата для каждой из дистанций получена оценка величины среднеквадратичного отклонения коэффициента

ошибки BER от его среднего значения. Максимальное значение отклонения составило 6%.

В параграфе 3.3 исследуется полученная статистика ошибок и проводится анализ паттерн-эффекта как с точки зрения его информационного проявления, так и с точки зрения физических причин его возникновения.

Вводится понятие *триплета* и *квинтуплета* как набора трёх и пяти последовательно идущих битов соответственно. Триплет и квинтуплет называются ошибочными, если их средний бит на приёмнике детектирован некорректно. Далее в параграфе приводится распределение ошибок по каждому из 32 квинтуплетов для нескольких дистанций распространения. Пример распределения для дистанции 4500 км показан на рис. 1. Красные столбцы гистограммы представляют распределение ошибок по триплетам, голубые — по квинтуплетам. Как видно из рисунка, статистика ошибок является неравномерной в следующем смысле: есть триплеты, на долю которых приходится большое количество ошибок, и есть триплеты, вносящие малый вклад в общее число ошибок. Например, видно, что на триплет «101» приходится почти 40% ошибок, тогда как вклад триплета «000» в общее количество ошибок практически равен нулю.

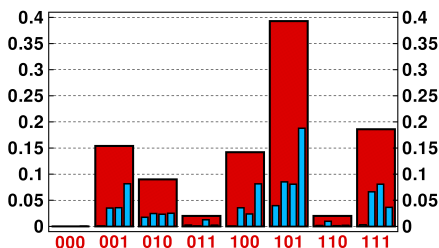


Рисунок 1 — Распределение ошибок по триплетам для дистанции 4500 км

На рис. 2 показаны индикаторные диаграммы принятого сигнала для триплетов «000» и «101». Как видно из рисунка, триплет «000» является полностью безошибочным. На рисунке отчетливо видны части заднего и переднего фронтов импульсов, которые соответствуют квинтуплету «10001». При начальном распределении эти импульсы лишь немного накладываются на соседний битовый интервал, но по мере распространения они существенно расширяются и могут занимать до половины соседнего битового интервала. Причиной обнаруженного временного дрожания

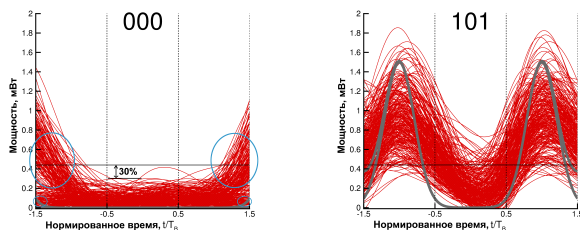


Рисунок 2 — Индикаторные диаграммы триплетов «000» и «101» после 4500 км

ния сигнала является внутриканальная фазовая кросс-модуляция. Для триплета «101» помимо временного дрожания присутствуют большие флуктуации мощности в среднем битовом интервале, причиной которых является уширение соседних импульсов и внутриканальное четырёхволновое смешение. Вследствие этих искажений корректное детектирование среднего бита представляет для приёмника наибольшую трудность.

Глава 4 посвящена моделированию паттерн-эффекта при передаче информации по линии связи с использованием фазовых методов модуляции сигнала.

В параграфе 4.1 даётся постановка задачи и описывается конфигурация ВОЛС. Для кодирования информации используется как двухуровневый (BPSK), так и четырёхуровневый (QPSK) фазовый метод модуляции сигнала [6]. BPSK является двоичным методом и для него используется такой же символьный алфавит, как и для ООК — $\{0, 1\}$. Для QPSK используется алфавит из четырёх символов $\{0, 1, 2, 3\}$, где каждый символ переносит два бита информации.

В параграфе 4.2 представлены результаты прямого счёта статистики ошибок для двух режимов распространения сигнала: линейный режим ($L_D \ll L_N \sim L$) и нелинейный режим ($L_D \sim L_N \ll L$). Для каждого из режимов проводится триплетный анализ с целью выявить неравномерное распределение ошибок по триплетам для разных дистанций распространения. По результатам анализа показано, что паттерн-эффект наблюдается для нелинейного режима распространения, тогда как в линейном случае распределение ошибок по триплетам равномерное. Для подтверждения того, что наблюдаемые результаты являются следствием влияния на сигнал нелинейных эффектов, в конце параграфа приводятся результаты расчётов распространения сигнала в нелинейном режиме без добавления шумов усилителей. Для метода QPSK результаты показаны в таблице 2, где N_{err} — количество ошибок для триплета,

ξ_{err} — его доля в общем количестве ошибок. Видно, что триплет «000» и подобные ему по фазовому профилю триплеты вносят большой вклад в общее число ошибок, тогда как некоторые триплеты, например «002», практически не вносят ошибок.

Таблица 2 — Распределение ошибок по триплетам. $BER=5 \cdot 10^{-4}$, $L = 1400$ км.

Триплет	N_{err}	ξ_{err}	Триплет	N_{err}	ξ_{err}
000&111&222&333	345	16,55%	020&131&202&313	290	13,91%
001&112&223&330	88	4,22%	021&132&203&310	117	5,61%
002&113&220&331	9	0,43%	022&133&200&311	16	0,77%
003&110&221&332	88	4,22%	023&130&201&312	69	3,31%
010&121&232&303	14	0,67%	030&101&212&323	12	0,58%
011&122&233&300	94	4,51%	031&102&213&320	70	3,36%
012&123&230&301	329	15,78%	032&103&210&321	331	15,88%
013&120&231&302	129	6,19%	033&100&211&322	84	4,03%

В параграфе 4.3 проводится дальнейшее исследование причин паттерн-эффекта, наблюдаемого при нелинейном режиме распространения. Для этого выбирается множество триплетов, представляющих наибольший интерес, и рассматриваются искажения соответствующего им сигнала. На рис. 3 показаны индикаторные диаграммы профиля мощности для метода QPSK, из которых видно, что для триплета «000» мощность внутреннего импульса уменьшается, тогда как мощность внешних импульсов увеличивается. Для триплета «002», наоборот, наблюдается увеличение мощности внутреннего импульса и уменьшение мощности внешних импульсов. Таким образом, выявлены характерные изменения профиля трёх последовательно идущих импульсов, являющиеся следствием влияния нелинейных эффектов и зависящие от разницы фаз соседних импульсов.

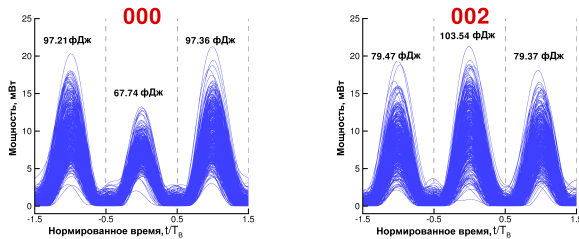


Рисунок 3 — Индикаторные диаграммы триплетов «000» и «002» после 1400 км.

На рис. 4 представлены констелляционные диаграммы, на которых каждая точка на фазовой плоскости соответствует значению амплитуды центрального импульса триплета. Из диаграмм видно, что облако триплета «000», как и облако триплета «002», имеет эллипсоидальный вид. Единственное, чем они отличаются, — это угол поворота облака: для триплета «000» оно растянуто по окружности, тогда как облако триплета «002» растянуто по радиусу. Областью корректного детектирования для данных триплетов является первый квадрант, поэтому триплет «000» чаще детектируется ошибочно, чем триплет «002». Эллипсоидальная форма совокупности точек свидетельствует о негауссовом характере искажения сигнала.

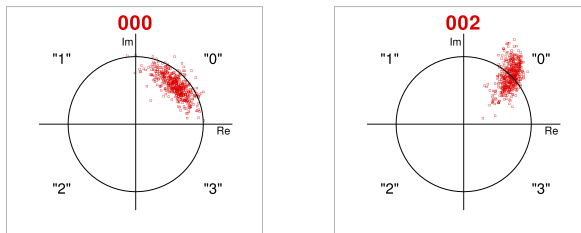


Рисунок 4 — Констелляционные диаграммы триплетов «000» и «002» после 1400 км

В параграфе 4.4 проводится моделирование передачи одиночных триплетов по линии связи той же конфигурации, что и в предыдущих параграфах. Выполнены расчёты распространения триплетов на 1400 км, подтверждающие полученные в прошлом параграфе результаты. На рис. 5 показано изменение формы импульсов для триплетов «000» и «002». Кроме того, для данных триплетов представлены расчёты распространения внутри одной секции, которые показывают, что динамика импульсов определяется межсимвольным взаимодействием и зависит от фаз соседних импульсов.

Глава 5 посвящена исследованию зависимости качества детектирования сигнала от накопленной в линии дисперсии при использовании дифференциального фазового метода модуляции без возвращения к нулю.

В параграфе 5.1 излагаются результаты лабораторных экспериментов по распространению оптического сигнала, закодированного с помощью дифференциального фазового метода модуляции без возвращения к нулю (RZ DPSK) и скоростью передачи 40 Гбит/с в одном

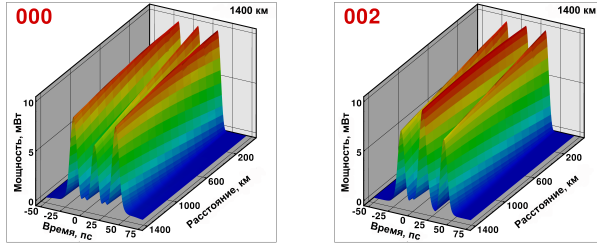


Рисунок 5 — Динамика формы импульсов для триплетов «000» и «002»

спектральном канале. Описаны конфигурации основной разрабатываемой линии общей длиной 1000 км стандартного одномодового волокна, «короткой» линии с участком стандартного волокна длиной 50 км и линии «back-to-back», состоящей из оптического передатчика, источника шума, компенсатора дисперсии и приёмника. На рис. 6 показаны экспериментальные зависимости коэффициента ошибки BER от накопленной дисперсии.

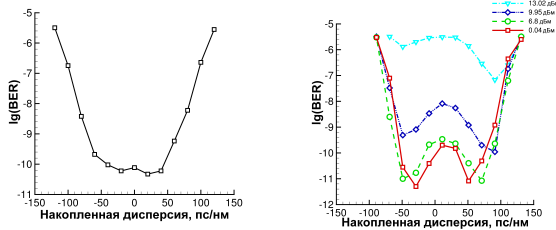


Рисунок 6 — Экспериментальная зависимость BER от накопленной дисперсии. Слева: для линии «back-to-back»; справа: для «короткой» линии;

В параграфе 5.2 описываются математические модели экспериментальных линий и проводится численное моделирование передачи информации с использованием построенных моделей. С помощью прямых численных расчётов и оценок на основе параметра качества Q -фактора обнаружено, что при ширине электрического фильтра 100 ГГц зависимость коэффициента ошибки от накопленной дисперсии имеет вид «полочки» для значений накопленной дисперсии от -50 пс/нм до 50 пс/нм. Полученные численные результаты, представленные на рис. 7, находятся в качественном соответствии с экспериментальными данными.

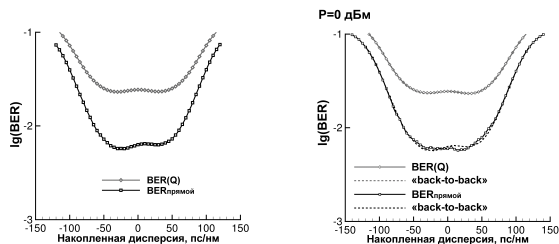


Рисунок 7 — Зависимость BER от накопленной дисперсии при $B_{el} = 100$ ГГц. Слева: для линии «back-to-back»; справа: для «короткой» линии

Кроме того, в параграфе исследуется вопрос зависимости качества детектирования сигнала от ширины электрического фильтра приёмника. Результаты численных расчётов показывают, что при передаче информации со скоростью 40 Гбит/с использование электрического фильтра с шириной 100 ГГц приводит к устойчивости оптической системы относительно накопленной дисперсии в некотором диапазоне, но ухудшает коэффициент ошибки, тогда как при использовании фильтра с шириной 40 ГГц коэффициент ошибки улучшается, но становится более чувствительным к отклонению накопленной дисперсии от нулевого значения.

В параграфе 5.3 с помощью численного моделирования исследуется зависимость коэффициента ошибки основной линии от таких параметров, как средняя мощность вводимого в волокно излучения, средняя дисперсия одной периодической секции и накопленная в линии дисперсия. Полученные результаты, представленные в виде линий уровня «токового» Q-фактора, показывают, что оптимальное значение мощности вводимого в линию сигнала составляет 2-4 дБм, что соответствует экспериментальному значению 3 дБм. Оптимальная величина средней дисперсии секции находится в области от -1.4 пс/нм/км до -0.9 пс/нм/км. При ширине электрического фильтра 100 ГГц зависимость качества детектирования от накопленной дисперсии имеет вид «полочки» в диапазоне от -50 пс/нм до 50 пс/нм. На рис. 8 приведены линии уровня «токового» Q-фактора в плоскости параметров начальной средней мощности сигнала и накопленной дисперсии при средней дисперсии секции 0 пс/нм/км и ширине электрического фильтра 100 ГГц.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Получены оценки величины шага по пространственной переменной, необходимого для численного решения нелинейного уравнения Шрёдингера методом расщепления по физическим процессам с заданной точностью.

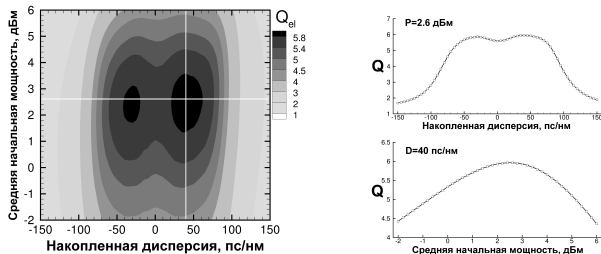


Рисунок 8 — Линии уровня «токового» Q-фактора в плоскости параметров начальной средней мощности сигнала и накопленной дисперсии при средней дисперсии секции 0 пс/нм/км

2. Создан комплекс программ для моделирования передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи, ориентированный на использование на высокопроизводительных вычислительных системах.

3. С помощью математического моделирования доказано, что качество передачи данных по многоканальной ВОЛС с использованием амплитудного метода модуляции и скоростью 40 Гбит/с в одном частотном канале ограничено внутриканальными нелинейными эффектами: внутриканальной фазовой кросс-модуляцией и внутриканальным четырёхволновым смешением. С помощью численных расчётов получена статистика ошибок для различных дистанций распространения. Показано, что вследствие влияния ВФКМ и ВЧС триплет «101» является самым «опасным» сочетанием последовательно идущих битов в потоке данных с точки зрения количества ошибок в центральном бите.

4. Определена зависимость формы искажений импульса от вида соседних импульсов при использовании двухуровневого и четырёхуровневого фазовых методов модуляции сигнала и доказано, что причиной паттерн-эффекта является межсимвольное взаимодействие, зависящее от разницы фаз соседних импульсов.

5. С помощью прямого счёта статистики ошибок и оценок на основе параметра качества Q-фактора доказано, что при использовании дифференциального фазового метода модуляции без возвращения к нулю качество передачи информации устойчиво к отклонению накопленной дисперсии от нулевого значения. Полученные численные результаты находятся в качественном соответствии с экспериментальными данными.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Skidin A., Redyuk A., Shtyrina O. et al. The analysis of the error statistics in a 5x40 Gbit/s fibre link with hybrid amplification // Optics Communications, V. 284(19), P. 4695–4698, 2011.

2. Редюк А.А., Штырина О.В., Наний О.Е. и др. Математическое моделирование экспериментального прототипа высокоскоростной линии связи на основе дифференциального фазового формата модуляции без возвращения к нулю // Квантовая электроника, Т. 41, № 10, С. 929–933, 2011.

3. Редюк А.А., Скидин А.С., Шафarenко А.В., Федорук М.П. Прямое моделирование статистики ошибок при передаче данных по высокоскоростной линии связи с помощью четырёхуровневого фазового формата модуляции // Квантовая электроника, Т. 42, № 7, С. 645–649, 2012.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций

1. Редюк А.А. Численное моделирование поляризационной модовой дисперсии в волоконно-оптических линиях связи // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Новосибирск.–2007.–С.69.

2. Скидин А.С., Федорук М.П., Редюк А.А. и др. Паттерн-эффект как результат действия нелинейных явлений в волоконных световодах и его подавление с помощью кодов с ограничениями // Материалы российского семинара по волоконным лазерам (RFL-2010), Ульяновск.–2010.–С.70–71.

3. Skidin A., Fedoruk M., Redyuk A. et al. Suppression of Patterning Effects in Digital Communications by an Adaptive Constrained Coding // Proc. of the 3rd IASTED Intern. Conf. on Automation, Control, and Information Technology (ACIT-2010), Novosibirsk.–2010.–P.182–185.

4. Редюк А.А., Штырина О.В., Наний О.Е. и др. Математическое моделирование экспериментального прототипа высокоскоростной линии связи на основе формата модуляции NRZ-DPSK // Труды всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2011), Пермь.–2011.–С.114–115.

5. Редюк А.А., Скидин А.С., Федорук М.П., Шафarenко А.В. Прямое моделирование статистики ошибок для фазовых форматов модуляции оптического сигнала // Материалы российского семинара по волоконным лазерам (RFL-2012), Новосибирск.–2012.–С.58–59.

Государственная регистрация программ для ЭВМ

1. Редюк А.А., Штырина О.В., Федорук М.П., Скидин А.С. Свидетельство №2012613880 о государственной регистрации программного комплекса для моделирования волоконно-оптических линий связи «OLSim-1», М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2012.

Список цитируемой литературы

- [1] Захаров, В.Е. Точная теория двумерной самофокусировки и одномерной автомодуляции волн в нелинейных средах / В.Е. Захаров, А.Б. Шабат // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики.— 1972.— Т. 61.— № 1.— С. 118–135.
- [2] Hasegawa, A. Transmission of Stationary Nonlinear Optical Pulses in Dispersive Dielectric Fibers. I. Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Applied Physics Letters.— 1973.— V. 23(3).— P. 142–144.
- [3] Hardin, R.H. Applications of the Split-Step Fourier Method to the Numerical Solution of Nonlinear and Variable Coefficient Wave Equations / R.H. Hardin, F.D. Tappert // SIAM Review.— 1973.— V. 15(2).— P. 423.
- [4] Anderson, C.J. Technique for Evaluating System Performance Using Q in Numerical Simulations Exhibiting Intersymbol Interference / C.J. Anderson, J.A. Lyle // Electronics Letters.— 1994.— V. 30(1).— P. 71–72.
- [5] Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г Агравал.— Москва: Мир, 1996.— 324 с.
- [6] Essiambre, R.-J. Advanced Optical Modulation Format / R.-J. Essiambre, P.J. Winzer // Journal of Lightwave Technology.— 2006.— V. 24(12).— P. 4711–4728.

Редюк Алексей Александрович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ
СВЯЗИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ
МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛА

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 20.05.2013	Формат 60 x 84 1/16
Печать офсетная	Усл. печ. л. 1.0
Заказ № 182	Тираж 100 экз.

Отпечатано ЗАО РИЦ «Прайс-курьер»
ул. Кутателадзе, 4г, т. 330-7202