

На правах рукописи



Сидельников Олег Сергеевич

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОДНО- И МНОГОМОДОВЫХ  
ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы  
и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2017

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

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук **Федорук Михаил Петрович**

Официальные оппоненты: **Дмитриев Александр Капитонович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
НГТУ, г. Новосибирск,  
профессор кафедры лазерных систем

**Злобина Екатерина Алексеевна**,  
кандидат физико-математических наук,  
ИАиЭ СО РАН, г. Новосибирск,  
научный сотрудник

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

Защита состоится 16 марта 2018 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 999.141.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук:

<http://www.ict.nsc.ru/ru/structure/discouncil/sidelnikov-os>

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук, доцент



Лебедев А. С.

## Общая характеристика работы

### **Актуальность темы исследования.**

Волоконно-оптические линии связи на сегодняшний день являются самыми эффективными информационными системами для передачи больших объемов данных на большие расстояния с высокой скоростью. В современных дальнемагистральных системах, основанных на стандартном одномодовом волокне, задействуются все имеющиеся степени свободы — время, частота, фаза и поляризация, которые могут быть использованы для модуляции и уплотнения сигналов. Нынешний рекорд скорости для стандартного одномодового волокна равен 101.7 Тб/с при передаче сигналов по трем пролетам длиной 55 км [1], однако дальнейшее увеличение пропускной способности таких систем затруднено в виду различных ограничений.

В настоящий момент наблюдается дисбаланс между ростом общемирового информационного трафика (порядка 40% в год) и ростом совокупной пропускной способности современных волоконно-оптических линий связи, который составляет лишь 20% в год. При таком развитии событий уже в ближайшие несколько лет существует риск замедления динамики информационного обмена. Развитие систем связи, основанных на многомодовых волокнах, рассматривается в настоящее время в качестве перспективного технологического пути для дальнейшего увеличения пропускной способности за счет одновременной передачи данных по разным модам волокна.

Исследование многомодовых линий связи началось совсем недавно, и большинство результатов получено в лабораторных условиях и не применимо для передачи данных на большие расстояния, потому что в этом случае возникают новые эффекты, влияющие на передаваемые сигналы, такие как линейная связь мод, дифференциальная групповая задержка и нелинейные межмодовые эффекты. В последнее время стали появляться работы, посвящённые использованию многомодовых волокон в реальных линиях связи [2, 3]. Однако авторы данных работ либо рассматривают распространение на слишком короткие дистанции, либо используют неполные модели, учитывающие лишь малое число эффектов. Поэтому в настоящее время являются актуальными исследования, посвящённые использованию многомодовых волокон в линиях связи в качестве

способа увеличения пропускной способности.

**Целью диссертационной работы** является изучение влияния нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых линиях связи в режимах сильной и слабой связи мод. Для достижения поставленной цели был разработан численный алгоритм для решения нелинейного уравнения Манакова с первой производной по медленному времени, проведено сравнение качества передачи данных при распространении сигналов в многомодовых волокнах в режимах сильной и слабой связи мод и разработана схема компенсации нелинейных искажений, основанная на динамических нейронных сетях.

### **Научная новизна.**

1. Разработана компактная схема повышенного порядка точности для решения нелинейного уравнения Манакова с первой производной по времени, описывающего распространение сигналов в многомодовых волокнах, движущихся с различной групповой скоростью.

2. На основе проведённого сравнения коэффициентов битовых ошибок при передаче сигнала по многомодовым волокнам в зависимости от режима связи показано превосходство случая слабой связи мод над случаем сильной связи.

3. Продемонстрировано существенное повышение качества передачи данных при использовании схемы адаптивной модуляции для передачи 16-QAM сигналов по оптическим линиям связи.

4. Применение впервые предложенной схемы обработки оптических сигналов и компенсации нелинейных искажений, основанной на динамических нейронных сетях, позволило повысить качество передачи данных и увеличить длину распространения при сохранении того же уровня ошибок.

**Достоверность** представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается строгим теоретическим обоснованием свойств предложенных численных алгоритмов и детальным сравнением полученных результатов с известными аналитическими решениями, а также с численными результатами, полученными другими авторами.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанные методы моделирования нелинейного распространения оптического сигнала в системах связи, основанных на многомодовых волокнах, а также реализующий их комплекс программ могут быть применены для проектирования, анализа и опти-

мизации современных волоконно-оптических линий связи. Предложенная компактная схема повышенного порядка точности позволяет значительно сократить время расчётов при моделировании нелинейного распространения оптических сигналов в многомодовых волокнах в промежуточных режимах связи мод по сравнению с методом расщепления.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении гранта РНФ 14-21-00110 “Моделирование сложных нелинейных лазерных и телекоммуникационных систем” (2014–2016 гг.), Гранта Министерства образования и науки РФ 14.В25.31.0003 “Физическая платформа нелинейных фотонных технологий и систем” (2013–2017 гг.), проекта ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” №14.578.21.0029 “Технология суперканалов в волоконных линиях связи” (2014–2016 гг.) и Гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских учёных “Моделирование и применение многомодовых волокон в задачах увеличения пропускной способности волоконно-оптических линий связи”, договор №14.W01.16.9240-МК (2016–2017 гг.).

**Представление работы.** Основные результаты работы докладывались на объединённом научном семинаре Института вычислительных технологий СО РАН, кафедры математического моделирования НГУ и кафедры вычислительных технологий НГТУ «Информационно-вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)» № 8/17 30 мая 2017 г. под руководством академика РАН Ю. И. Шокина и д.ф.-м.н. В. М. Ковени, а также на Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2015, г. Пермь), на Российском семинаре по волоконным лазерам (RFL-2016, г. Новосибирск), на Всероссийских конференциях молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (УМ-2015, г. Красноярск, УМ-2016, г. Новосибирск), на Международной конференции “Математические и информационные технологии” (MIT-2016, Сербия, г. Врнячка Баня и Черногория, г. Будва), на Международной научной конференции “Наука будущего” (г. Казань, 2016), на Международной конференции “European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference” (CLEO-2017, г. Мюнхен).

**На защиту выносятся следующие положения,** соответствующие пунктам паспорта специальности 05.13.18 — “Математическое моделирование,

численные методы и комплексы программ”:

*Пункт 3: “Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий”*

1. Компактная схема повышенного порядка точности для решения нелинейного уравнения Манакова с первой производной по времени, описывающего распространение сигналов в многомодовых волокнах, движущихся с различной групповой скоростью;

2. Схема обработки сигналов и компенсации нелинейных искажений, основанная на динамических нейронных сетях;

*Пункт 4: “Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента”*

1. Программный комплекс, предназначенный для нахождения пространственного распределения мод и вычисления констант распространения всех мод оптического волокна с произвольным профилем показателя преломления;

2. Программный комплекс для моделирования распространения оптических сигналов в системах передачи данных, основанных на многомодовых волокнах;

*Пункт 5: “Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента”*

1. Обеспечивающий наилучшее качество передачи данных режим связи мод, определённый с помощью математического моделирования;

2. Оценка улучшения качества передачи квадратурно-амплитудного сигнала при использовании методов адаптивной модуляции;

3. Определённые с помощью методов математического моделирования оптимальные параметры схемы компенсации нелинейных искажений, основанной на динамических нейронных сетях, необходимые для повышения качества передачи данных.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 12-ти работах, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 6 — в тезисах международных и всероссийских конференций, 1 — свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ .

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в постановке, обсуждении и обосновании решаемых задач, а также в разработке, тестировании и реализации предложенных алгоритмов и компьютерных программ. Все численные расчеты проводились автором лично. Автор принимал активное участие в анализе и интерпретации полученных данных, оформлении публикаций в виде научных статей и докладов.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** дано краткое введение в проблематику задачи, представлена основная терминология и описаны ключевые этапы развития волоконно-оптических линий связи.

В **параграфе 1.1** представлены теоретические основы моделирования волоконно-оптических линий связи. Рассмотрены два важных случая распространения сигналов в многомодовых волокнах, представляющих практический интерес, — режимы слабой и сильной связи мод. В режиме слабой связи мод нелинейное распространение сигналов в многомодовых волокнах описывается следующим уравнением Манаква [4]:

$$\frac{\partial A_p}{\partial z} + \beta_{1p} \frac{\partial A_p}{\partial t} + i \frac{\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 A_p}{\partial t^2} = i \gamma \left( f_{pppp} \frac{8}{9} |A_p|^2 + \sum_{m \neq p} f_{mmp} \frac{4}{3} |A_m|^2 \right) A_p, \quad (1)$$

где  $A_p(z, t)$  — медленно меняющаяся огибающая  $p$ -ой моды,  $\beta_{1p}$  и  $\beta_{2p}$  — обратная групповая скорость и дисперсия групповой скорости  $p$ -ой пространственной моды, соответственно,  $\gamma$  — нелинейный параметр волокна,  $f_{lmnp}$  — коэффициенты нелинейной связи между пространственными модами.

В случае сильной связи мод, уравнение распространения сигналов описывается следующим уравнением Манаква [5]:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial z} + \beta' \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + i \frac{\beta''}{2} \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} = i \gamma \kappa |\bar{A}|^2 \bar{A}, \quad (2)$$

где

$$\kappa = \sum_{k \leq l}^M \frac{32}{2^{\delta_{kl}}} \frac{f_{kkl}}{6M(2M+1)}, \quad (3)$$

$\bar{A}$  — вектор медленных амплитуд мод,  $\beta'$  — средняя обратная групповая скорость и  $\beta'' = \text{trace}(\mathcal{B}_2)/2M$  — средняя дисперсия групповой скорости.

Изложены основные негативные эффекты, приводящие к деградации сигнала в линиях связи: дисперсионные и нелинейные эффекты и оптические потери. Дисперсия приводит к уширению импульса при распространении, нелинейность проявляется в искажении спектра сигнала, а вследствие оптических потерь падает мощность сигнала. Приведено краткое описание численных методов, использующихся для решения уравнений распространения.

В **параграфе 1.2** представлено устройство многомодовых волоконно-оптических линий связи. Подробно описаны этапы формирования оптических сигналов на основе входной битовой последовательности в передатчике многомодовой линии связи с использованием различных форматов модуляции и формирующих фильтров. Приведено устройство оптического канала системы передачи данных. Изложены основные параметры, влияющие на количество поддерживаемых мод. Описана модель усилителя, компенсирующего потери, возникшие за время распространения сигнала по волокну, и вносящего шумовую добавку. Представлена процедура обработки и детектирования сигналов в приёмнике линии связи. Даны определения основным параметрам, по которым сравниваются между собой различные системы передачи данных: коэффициент битовых ошибок BER и параметр качества Q-фактор.

В **параграфе 1.3** описаны особенности исследования многомодовых оптических линий связи. Представлены два основных профиля показателя преломления оптического волокна, исследуемых в данной работе: ступенчатый профиль и градиентный профиль показателя преломления с “траншеей” в оболочке. Описаны некоторые особенности, возникающие при решении уравнений распространения оптических сигналов в многомодовых волокнах в режимах сильной и слабой связи мод.

Во **второй главе** представлены основные численные методы решения уравнений распространения оптических сигналов в многомодовых волокнах.

В **параграфе 2.1** описан наиболее распространенный метод решения урав-



нений волоконной оптики — метод расщепления по физическим процессам с использованием преобразования Фурье на линейном шаге (SSFM). Для использования метода SSFM удобно записать уравнение распространения в виде:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N}) A, \quad (4)$$

где  $\hat{D}$  — диагональный оператор, соответствующий дисперсионной части уравнения и  $\hat{N}$  — диагональный оператор, учитывающий нелинейные эффекты распространения. Тогда используемый в данной работе симметричный вариант метода расщепления по физическим процессам имеет следующий вид:

$$A(z + h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp(h\hat{N}) \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T). \quad (5)$$

Данная схема имеет второй порядок точности по шагу  $h$ .

Показано, что, несмотря на высокую точность по временной переменной и простоту реализации, данный метод имеет существенный недостаток — при решении уравнений распространения сигналов в промежуточных режимах связи метод расщепления требует больших вычислительных затрат.

В **параграфе 2.2** подробно описан вывод компактной конечно-разностной схемы повышенного порядка аппроксимации для решения уравнений Манакова с первой производной по времени:

$$i\frac{A_p^{n+1} - A_p^n}{h} = i\beta_1 (T(\alpha_1 A_p^{n+1} + (1 - \alpha_1)A_p^n) + \alpha_2 \Lambda A_p^n) + \frac{\beta_2}{2} \Lambda (\alpha_3 A_p^{n+1} + (1 - \alpha_3)A_p^n) - \gamma \left( \frac{f^{n+1} + f^n}{2} + \alpha_2 T f^n + \alpha_4 \Lambda f^n \right), \quad (6)$$

где  $f$  соответствует нелинейной части уравнения распространения, а коэффициенты  $\alpha_i$  имеют следующий вид:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} - \frac{\tau^2 \beta_1^2}{6\beta_2^2} - i\frac{\tau^2}{6\beta_2 h}, \quad \alpha_2 = \frac{\tau^2 \beta_1^3 h}{3\beta_2^2} + i\frac{\tau^2 \beta_1}{6\beta_2}, \quad (7)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{2} - i\frac{\tau^2}{6\beta_2 h}, \quad \alpha_4 = \frac{\tau^2}{12}. \quad (8)$$

Данная схема имеет порядок аппроксимации  $O(h^2 + \tau^4)$ , а для устойчивости схемы необходимо выполнение следующих условий:

$$\tau \leq \left| \frac{\beta_2}{\beta_1} \right|, \quad h \leq \frac{|\beta_2|}{\beta_1^2}. \quad (9)$$

Предложенная схема обладает высокой эффективностью распараллеливания и в отличие от метода расщепления не требует больших вычислительных затрат при решении уравнений распространения в промежуточных режимах связи, хотя и уступает данному методу в точности расчёта на фиксированной сетке по временной переменной.

В параграфе 2.3 представлены результаты численных расчётов для рассмотренных методов. Численные решения, полученные с помощью метода расщепления и компактной схемы, сравнивались с точными решениями скалярного нелинейного уравнения Шредингера и связанного НУШ для двух поляризационных компонент. В ходе тестовых расчётов был подтвержден общий порядок точности схем.

Проведено сравнение времени расчетов исследуемых схем при решении уравнений распространения оптических сигналов в промежуточных режимах связи в зависимости от числа мод. Показано, что уже при четырёх модах компактная схема опережает метод расщепления по времени вычисления, и с ростом числа мод это превосходство растет.

Третья глава посвящена исследованию влияния нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах.

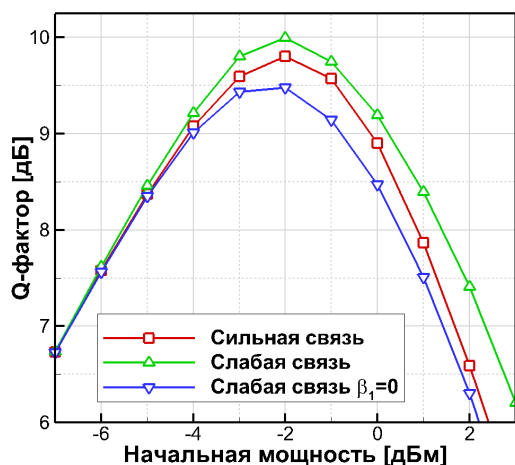


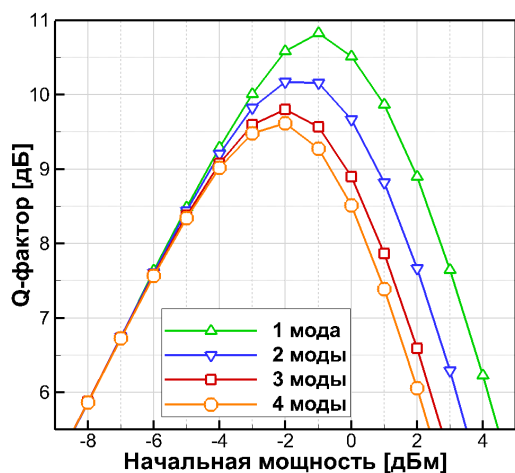
Рисунок 1 – Сравнение режимов связи мод для ступенчатого волокна.

В параграфе 3.1 представлены результаты численного моделирования для многомодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления. Описаны основные параметры исследуемой системы связи, основанной на волокне, поддерживающим распространение 4 мод без учёта вырожденных. Для

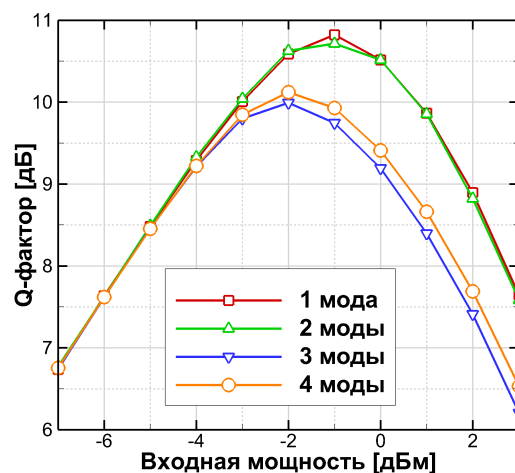
данного волокна проведено сравнение режимов сильной и слабой связи при передаче данных по всем модам волокна. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

Показано, что режим слабой связи обеспечивает лучшее качество передачи данных, так как в этом случае сигналы в разных модах движутся с разными скоростями и нелинейное взаимодействие между ними уменьшается. Продемонстрировано превосходство режима сильной связи надо режимом слабой связи, в котором сигналы в различных модах движутся с одинаковой скоростью. Это объясняется тем, что в случае сильной связи нелинейный параметр  $\kappa$  (3) будет меньше, чем нелинейная часть в режиме слабой связи мод (1).

Продемонстрировано уменьшение коэффициента битовых ошибок при увеличении дифференциальной модовой задержки. Количество ошибок уменьшается до некоторого предела, соответствующего случаю, когда оптический импульс в одной пространственной моде по ходу распространения доходит до соседнего импульса в другой моде.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Зависимость параметра Q-фактор от начальной мощности сигнала для ступенчатого волокна при передаче данных в режимах сильной (а) и слабой (б) связи мод.

Для многомодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления проведено исследование влияния нелинейных эффектов при увеличении числа мод в режимах сильной и слабой связи мод. Полученные результаты представлены на рисунке 2. В случае сильной связи показано, что увеличение числа

мод приводит к ухудшению качества передачи, однако уменьшение Q-фактора замедляется для большого числа мод. Это связано с тем, что в режиме сильной связи мод нелинейный параметр  $\kappa$  (3) уменьшается с ростом числа используемых мод.

Для случая слабой связи продемонстрировано ухудшение качества передачи данных для моды с малым дисперсионным параметром (третья мода рассматриваемого волокна). Сигнал, распространяющийся в такой моде, испытывает меньшее дисперсионное уширение и, следовательно, больше подвержен нелинейным искажениям. Показано улучшения параметра Q-фактора при добавлении четвертой моды с достаточно большим дисперсионным параметром.

В параграфе 3.2 представлены результаты исследования влияния нелинейных эффектов на распространение сигналов в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления с “траншеей” в оболочке (GCST) в режиме слабой связи мод. Такое волокно в настоящее время широко применяется при конструировании линий связи большой дальности, так как оно позволяет упростить обработку сигналов в приемнике.

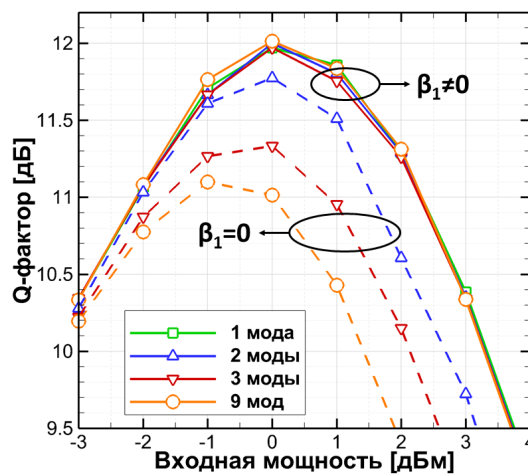


Рисунок 3 – Зависимость параметра Q-фактор, вычисленного для моды LP01, от начальной мощности сигнала для GCST волокна.

Приведены основные параметры волокна, поддерживающего распространение 9 мод. Для такого волокна проведено исследование влияния нелинейных эффектов на сигнал, распространяющийся в фундаментальной моде LP01 при увеличении числа задействованных мод (рисунок 3). Показано, что в случае, когда сигналы движутся с разными скоростями, добавление новых мод практически не оказывает влияние на качество данных в рассматриваемой моде. В

случае же одинаковых скоростей рост числа мод приводит к ухудшению параметра качества моды LP01 за счет высокого нелинейного взаимодействия между различными модами.

На основе полученных результатов для многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления с “траншеей” в оболочке продемонстрирован рост параметра качества Q-фактор, усреднённого по всем пространственным модам, при увеличении числа задействованных мод. Для режима слабой связи, в котором сигналы в разных модах движутся с одинаковыми скоростями, показано, что с ростом числа используемых мод до трех значение усредненного параметра Q-фактор уменьшается. Однако при дальнейшем увеличении числа мод параметр качества незначительно возрастает, так как для мод высокого порядка нелинейные коэффициенты  $f_{mmp}$  малы, и данные моды меньше подвержены влиянию нелинейных эффектов.

**Четвертая глава** посвящена методам компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях связи.

В **параграфе 4.1** исследованы особенности искажения квадратурно-амплитудного оптического сигнала в нелинейном режиме. Приведены параметры исследуемых линий связи, основанных на одноканальной передаче и на технологии мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM).

Проведен анализ влияния нелинейности на статистику символьных ошибок при передаче 16-QAM сигналов по оптическим линиям связи и показано, что количество ошибок на разных кругах сигнального созвездия зависит не только от мощности сигнала, но и от символьной скорости. На основе полученных данных была реализована схема адаптивной модуляции [6], которая по текущему распределению ошибок изменяет вероятность попадания символов на различные круги сигнального созвездия 16-QAM так, чтобы уменьшить коэффициент символьных ошибок. Однако при изменении вероятности появления символов в различных кольцах сигнального созвездия увеличивается избыточность сообщения передачи. Поэтому для данной схемы найдена зависимость степени снижения символьных ошибок от избыточности кода и показано, что количество ошибок может быть уменьшено вдвое при избыточности 12%. Таким образом, всегда может быть найден компромисс между степенью снижения

коэффициента символьных ошибок и допустимой избыточностью в потоке данных.

Для схемы адаптивной модуляции продемонстрировано значительное повышение качества передачи данных при увеличении избыточности сообщения (рисунок 4). В данном случае оптимальная мощность постепенно увеличивается по мере увеличения избыточности, что позволяет эффективно использовать большие мощности сигнала.

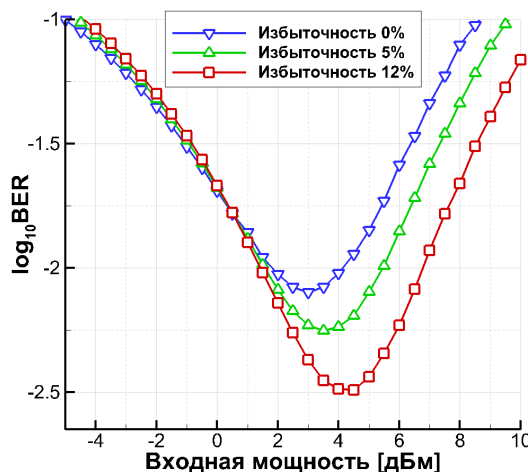


Рисунок 4 – Зависимость BER от начальной мощности сигнала для различного значения избыточности адаптивной модуляции.

Продемонстрировано, что использование адаптивного модулятора позволяет увеличить расстояние распространения до 500 км по сравнению с сигналом без кодирования при том же уровне ошибок, близком к пределу прямой коррекции ошибок.

В **параграфе 4.2** рассмотрены схемы цифровой обработки сигналов, основанные на методах машинного обучения. Исследованы линии связи как с одноканальной передачей, так и с передачей сигналов по 5 каналам с использованием технологии спектрального уплотнения каналов (WDM).

Описан эффект памяти канала и обоснована низкая эффективность компенсации нелинейности схем на основе статических нейронных сетей. С учетом этого предложена схема обработки оптических сигналов и компенсации нелинейных искажений в приемнике системы связи, основанная на динамических нейронных сетях, которая для предсказания, какой символ был на входе, использует не только соответствующий символ на выходе, но и ещё несколько

предыдущих. Подробно описаны основные параметры и архитектура исследуемой нейронной сети.

Для данной схемы определена зависимость длины задержки от количества пролётов системы связи. Показано, что длина задержки увеличивается с ростом числа используемых пролётов, поскольку в данном случае увеличивается также и память канала, причём данная зависимость имеет явно линейный характер.

Для исследования эффективности предложенной схемы она сравнивалась с линейной схемой компенсации нелинейных искажений, которая восстанавливает только фазу принятого сигнала, и с методом обратного распространения сигнала (DBP), в котором уравнение распространения решается в обратную сторону при использовании 2 шагов по пространственной переменной на каждый пролёт. Полученные результаты представлены на рисунке 5.

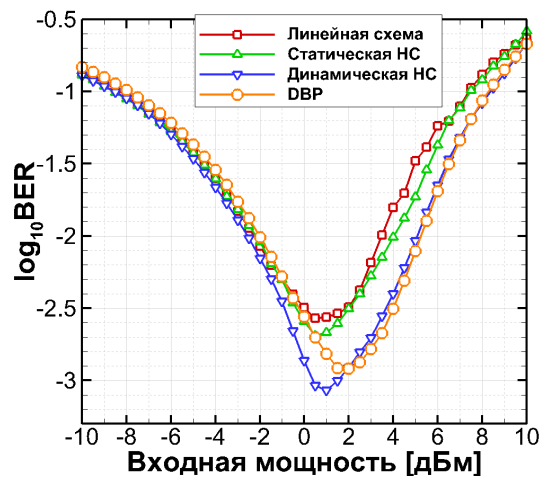


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента битовых ошибок от мощности начального сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений.

Продемонстрировано, что система с линейной схемой компенсации показывает худшие результаты. Использование статической нейронной сети (т.е. без блоков задержки) лишь немного улучшает качество передачи данных по сравнению с линейной схемой. Показано, что схема, основанная на динамической нейронной сети, превосходит остальные методы компенсации нелинейных искажений, в том числе и наиболее эффективный на сегодняшний день метод обратного распространения с использованием 2 шагов в каждом пролёте. Аналогичные результаты были получены для форматов модуляции 32-QAM и 64-QAM.

Продемонстрировано уменьшение количества требуемых операций на один переданный бит при использовании для компенсации нелинейных искажений

динамической нейронной сети по сравнению с методом обратного распространения сигнала при использовании 2 шагов в каждом пролёте.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработана компактная конечно-разностная схема повышенного порядка точности для решения уравнений Манакова с первой производной по времени, описывающих распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах. Продемонстрировано, что предложенная схема позволяет сократить время расчетов по сравнению с методом расщепления по физическим процессам при моделировании нелинейного распространения оптических сигналов в многомодовых волокнах в промежуточных режимах связи мод.

2. Разработан программный комплекс для моделирования распространения оптических сигналов в системах передачи данных, основанных на многомодовых волокнах.

3. Для многомодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления проведено сравнение режимов сильной и слабой связи мод и показано, что случай слабой связи обеспечивает лучшее качество передачи данных. Для данного типа волокна также продемонстрировано ухудшение качества передачи данных для сигнала, распространяющегося в моде с малым дисперсионным параметром.

4. Для многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления с “траншеей” в оболочке в режиме слабой связи показано, что добавление новых мод практически не влияет на сигналы, распространяющиеся в других модах. Продемонстрировано, что в случае, когда сигналы в разных модах движутся с одинаковыми скоростями, увеличение числа мод приводит к ухудшению качества передачи данных.

5. Реализована схема адаптивного модулятора, которая по текущему распределению ошибок изменяет вероятность попадания символов на различные круги сигнального созвездия 16-QAM так, чтобы уменьшить коэффициент символьных ошибок. Для данной схемы найдена зависимость между степенью снижения коэффициента символьных ошибок и избыточностью в потоке данных. Показано, что при увеличении избыточности сообщения качество передачи данных значительно повышается.

6. Разработана схема обработки оптических сигналов и компенсации нели-



нейных искажений в приемнике системы связи, основанная на динамических нейронных сетях. Проведено сравнение качества передачи данных при использовании различных методов компенсации нелинейности и показано превосходство предложенной схемы. Показано, что предложенная схема с динамической нейронной сетью позволяет снизить количество требуемых операций на один переданный бит по сравнению с методом обратного распространения сигнала при использовании 2 шагов в каждом пролёте.

## Основные публикации по теме диссертации

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Сидельников, О. С. Алгоритмы численного моделирования оптических линий связи на основе многомодовых волокон / О. С. Сидельников, М. П. Федорук // Вычислительные технологии. — 2015. — Т. 20, № 5. — С. 105–119.

2. Численное моделирование многомодовых волоконно-оптических линий связи / О. С. Сидельников, С. Сиглетос, Ф. Феррейра, М. П. Федорук // Квантовая электроника. — 2016. — Т. 46, № 1. — С. 70–80.

3. Скидин, А. С. Компенсация нелинейных воздействий на оптический мультиплексированный с ортогональным частотным разделением каналов сигнал с использованием метода адаптивной модуляции / А. С. Скидин, О. С. Сидельников, М. П. Федорук // Квантовая электроника. — 2016. — Т. 46, № 12. — С. 1113–1116.

4. Mitigation of nonlinear transmission effects for OFDM 16-QAM optical signal using adaptive modulation / A. S. Skidin, O. S. Sidelnikov, M. P. Fedoruk, S. K. Turitsyn // Optics Express. — 2016. — Vol. 24, No. 26. — P. 30296–30308.

5. Сидельников, О. С. Нелинейные эффекты при передаче оптического сигнала в многомодовом волокне в режиме слабой связи мод / О. С. Сидельников, А. А. Редюк // Квантовая электроника. — 2017. — Т. 47, № 4. — С. 330–334.

### Публикации в трудах международных и всероссийских конференций:

6. Численное моделирование многомодовых волоконно-оптических линий связи / О. С. Сидельников, С. Сиглетос, С. К. Турицын и др. // Тезисы докладов V Всероссийской конференции по волоконной оптике, ВКВО-2015. Пермь.

7-9 октября 2015 г. Москва: Фотон-Экспресс. — 2015. — С. 38–39.

7. Численное моделирование многомодовых волоконно-оптических линий связи / О. С. Сидельников, С. Сиглетос, С. К. Турицын и др. // Тезисы докладов XVI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Красноярск. 28-30 октября 2015 г. Новосибирск: ИВТ СО РАН. — 2015. — С. 50–51.

8. Численное моделирование многомодовых волоконно-оптических линий связи / О. С. Сидельников, А. А. Редюк, С. К. Турицын, М. П. Федорук // Сборник трудов конференции “Математические и информационные технологии, MIT-2016”. 28-31 августа 2016 г., Врнячка Баня, Сербия; 1-5 сентября 2016 г., Будва, Черногория. — 2016. — С. 95–96.

9. Компенсация нелинейных воздействий на оптический OFDM-сигнал с использованием метода адаптивной модуляции / А. С. Скидин, О. С. Сидельников, С. К. Турицын, М. П. Федорук // Материалы 7-го Российского семинара по волоконным лазерам. Новосибирск. 5-9 сентября 2016 г. Новосибирск: НГУ. — 2016. — С. 170–171.

10. Sidelnikov, O. S. Mathematical modeling of nonlinear propagation of the signal in the multimode fiber-optic communication lines / O. S. Sidelnikov // Proceedings of the 2nd International Scientific Conference “Science of the Future”. Kazan. September 20-23, 2016. Moscow: Inconsult. — 2016. — P. 549–550.

11. Сидельников, О. С. Математическое моделирование многомодовых волоконно-оптических линий связи / О. С. Сидельников, А. А. Редюк // Тезисы докладов XVII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Новосибирск. 30 октября – 3 ноября 2016 г. Новосибирск: ИВТ СО РАН. — 2016. — С. 67.

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

12. Сидельников, О. С. Программный комплекс для нахождения параметров мод оптического волокна MMFModeSolver / О. С. Сидельников, А. А. Редюк, М. П. Федорук. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661848 от 24.10.2016 г.

## Список цитируемой литературы

1. 101.7-Tb/s (370×294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM Transmission over 3×55-km SSMF using Pilot-based Phase Noise Mitigation / D. Qian, M. F. Huang, E. Ip et al. // Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. — 2011. — P. PDPB5.
2. Transmission of 200 Tb/s (375 × 3 × 178.125 Gb/s) PDM-DFTS-OFDM-32QAM super channel over 1 km FMF / M. Luo, Q. Mo, X. Li et al. // Frontiers of Optoelectronics. — 2015. — Vol. 8, No. 4. — P. 394–401.
3. Impact of mode-dependent loss on long-haul transmission systems using few-mode fibers / E. Ip, G. Milione, Y. K. Huang, T. Wang // Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference. — 2016. — P. W4I.4.
4. Mumtaz, S. Nonlinear propagation in multimode and multicore fibers: Generalization of the Manakov equations / S. Mumtaz, R. J. Essiambre, G. P. Agrawal // Journal of Lightwave Technology. — 2013. — Vol. 31, No. 3. — P. 398–406.
5. Mecozzi, A. Nonlinear propagation in multi-mode fibers in the strong coupling regime / A. Mecozzi, C. Antonelli, M. Shtaif // Optics Express. — 2012. — Vol. 20, No. 11. — P. 11673–11678.
6. Mitigation of nonlinear transmission effects for OFDM 16-QAM optical signal using adaptive modulation / A. S. Skidin, O. S. Sidelnikov, M. P. Fedoruk, S. K. Turitsyn // Optics Express. — 2016. — Vol. 24, No. 26. — P. 30296–30308.