

На правах рукописи

Юшко Олеся Викторовна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛИТОННЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ НОВЫХ ФОРМАТОВ
И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2016

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: доктор технических наук,
профессор Григоров Игорь Вячеславович
ПГУТИ, г. Самара,
кандидат физико-математических наук
Денисов Владимир Иванович
ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск,

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

Защита состоится «30» сентября 2016 г. в 10 : 00 часов 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. Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВТ СО РАН.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ИВТ СО РАН: <http://www.ict.nsc.ru/ru/structure/discouncil/yusko-ov>

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.

Лебедев А.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Волоконно-оптические линии связи лидируют на рынке телекоммуникаций, обеспечивая экспоненциальный рост объема передачи информации на протяжении последних 30 лет [1]. В настоящее время именно они являются наиболее востребованным способом передачи информации, их пропускная способность составляет более 30 Тбит/с при дальности передачи сигнала до нескольких тысяч километров [2,3].

Распространённость видео-приложений, цифровых коммуникаций, необходимость быстрой передачи больших объёмов данных обуславливает высокий спрос на дальнейшее увеличение пропускной способности линий связи и дальности передачи информации. Однако существующие технологии уже не способны удовлетворить современные требования к скорости передачи данных, что может привести к параллельной прокладке волоконных систем — дорогостоящему и нежелательному решению. Основным ограничением дальнейшего увеличения пропускной способности волоконно-оптических линий связи является наличие нелинейных эффектов в волокне [4].

Одним из методов увеличения пропускной способности может послужить использование солитонов в качестве импульсов, переносящих информацию. Солитон является когерентной устойчивой структурой и способен распространяться, сохраняя свою форму за счёт взаимной компенсации нелинейных и дисперсионных эффектов.

Повысить эффективность линий связи также можно при помощи использования многоядерного волокна. Оно состоит из нескольких кварцевых ядер, расположенных внутри одной оболочки, и является альтернативой параллельной прокладке нескольких стандартных волоконных кабелей. Современный рекорд скорости передачи данных по многоядерному волокну составляет 140 Тбит/с на расстоянии до 7000 км [5] при использовании 7 ядер и нескольких спектральных каналов в каждом ядре.

Поскольку экспериментальные волоконно-оптические линии связи являются дорогостоящим объектом, а проведение экспериментов часто требует значительных временных затрат, в задачах оптимизации параметров и разработки линий связи широко используется математическое моделирование. Оно позволяет анализировать механизмы разрушения сигнала по мере его распространения по оптоволокну и оценивать эффективность линий связи. Таким образом, математическое моделирование и численные методы представляют собой мощный инструмент для решения

задач волоконной оптики. Численное моделирование применения солитонных технологий в задачах передачи информации по линиям связи с использованием высокопроизводительных вычислительных комплексов, без сомнения, является актуальным и перспективным направлением исследования.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является изучение преимуществ применения солитонных технологий в волоконно-оптических линиях связи, а также исследование возможности передачи информации по многоядерным световодам. В ходе работы решены следующие задачи: исследование современных методов обработки сигнала, применяемых в солитонных линиях связи; исследование и оптимизация режимов работы солитонных волоконно-оптических линий связи; разработка численного алгоритма для поиска стационарных решений системы уравнений, описывающей распространение электромагнитного поля в многоядерных световодах центрально-симметричной структуры.

Объектом исследования настоящей работы являются солитонные волоконно-оптические линии связи, главными элементами которых являются передатчик, волоконный световод, детектор сигнала и модуль цифровой обработки. Вторым объектом исследования является многоядерное волокно центрально-симметричной структуры, представляющее собой центральное ядро, окруженное N_c периферическими ядрами.

Научная новизна и значимость изложенных результатов диссертационной работы:

1. Впервые проведено исследование эффективности методов цифровой обработки сигнала и оптической фильтрации для подавления временных и фазовых флуктуаций в солитонных когерентных оптических линиях связи с использованием распределенного типа усиления.

2. Впервые продемонстрировано, что применение метода обратного распространения сигнала в солитонных линиях связи приводит к снижению величины флуктуаций фазы и положения импульсов до двух раз.

3. Впервые выполнено сравнение методов оптической фильтрации и обратного распространения сигнала. Показано, что на магистральных расстояниях применение обоих методов приводит к подавлению флуктуаций параметров солитона в равной степени. Однако на трансокеанских расстояниях более эффективно применение оптической фильтрации вследствие снижения общего количества шума.

4. Впервые проведена оптимизация параметров фазового и комбинированного форматов модуляции в солитонных когерентных линиях связи. Создан комплекс программ, предназначенный для генерации и декодирования сигнала произвольно выбранного порядка модуляции и оценки максимально достижимой спектральной эффективности.

5. Впервые проведена оценка спектральной эффективности и производительности когерентных солитонных волоконно-оптических линий связи. Выполнен анализ и сравнение производительности когерентных солитонных и традиционных линий связи. Показано, что солитонный формат передачи данных позволяет передавать информацию с бóльшей скоростью, либо на бóльшие расстояния.

6. Впервые разработан двухуровневый итерационный численный алгоритм нахождения стационарного локализованного пространственно-временного решения системы нелинейных уравнений, описывающей распространение электромагнитного поля в многоядерном волокне центрально-симметричной структуры.

Теоретическая и практическая значимость работы. До настоящего времени не проводилось исследований солитонных оптических линий связи с применением новейших технологий, таких как когерентная передача данных, многоуровневая модуляция сигнала, многоядерные волокна. Такие технологии в сочетании с использованием солитонной передачи данных обладают большим потенциалом, их применение может привести к преодолению современных «нелинейных» ограничений волоконных линий связи, а также к увеличению дальности и скорости передачи информации. Разработанные методы моделирования и программный комплекс могут быть применены для проектирования, оптимизации и исследования солитонных и традиционных волоконно-оптических линий связи.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении гранта РФФИ № 14-01-31258 «Солитонные технологии в когерентных линиях связи и лазерах» (2014 г), гранта Министерства образования и науки РФ № 14.В25.31.0003 «Физическая платформа нелинейных фотонных технологий и систем», ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 гг», гранта «Теоретическое и экспериментальное исследование нелинейных волоконных лазерных систем». Кроме того, работа была поддержана стипендией президента РФ на 2015–2016 гг.

На защиту выносятся следующие результаты, соответствующие паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

1. Двухуровневый итерационный численный алгоритм для нахождения стационарного решения системы уравнений, описывающей распространение импульсов в многоядерном волокне.

2. Комплекс программ для генерации и детектирования фазово-модулированного сигнала в волоконно-оптических линиях связи. Комплекс позволяет исследовать дискретные форматы модуляции и оценивать максимально достижимую спектральную эффективность с помощью непрерывного фазового формата модуляции.

3. Комплекс программ для исследования сигнала комбинированного формата модуляции. Комплекс позволяет генерировать и декодировать сигнал для любого дискретного порядка модуляции по двум параметрам – фазе и положению импульса. Также комплекс включает непрерывный двумерный формат модуляции для оценки максимально достижимой спектральной эффективности.

4. Комплекс программ для поиска стационарного пространственно-временного солитонного решения в многоядерных волокнах центрально-симметричной структуры, разработанный на основе предложенного двухуровневого итерационного алгоритма.

5. Результаты численной оптимизации солитонных волоконно-оптических линий связи по параметрам модуляции сигнала с целью достижения максимальной спектральной эффективности.

6. Результаты численного моделирования и сравнительного анализа эффективности методов цифровой обработки сигнала и оптической фильтрации, демонстрирующие, что применение цифровой обработки сигнала может привести к снижению величины флуктуаций фазы и положения импульса до 40%, а применение оптической фильтрации — до 4-х раз.

7. Результаты численного моделирования и сравнительного анализа производительности и спектральной эффективности традиционных и солитонных волоконно-оптических линий связи в режиме сильного влияния нелинейных эффектов волокна. Продемонстрировано преимущество в 6 дБ использования солитонных линий связи в сочетании с применением комбинированных форматов модуляции, что подтверждает возможность передачи информации на большие расстояния или с большей скоростью.

Обоснованность и достоверность представленных в диссертационной работе результатов основывается на согласованности результатов тестовых расчётов с известными аналитическими решениями, а также с численными результатами, полученными другими авторами.

Представление работы. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждались на объединённом научном семинаре Института вычислительных технологий СО РАН «Информационно-вычислительные технологии (численные методы механики сплошной среды)» № 6/16 под руководством академика РАН Ю. И. Шокина и д.ф.-м.н. В. М. Ковени, а также на IV и V Всероссийской конференции по волоконной оптике (ВКВО-2013 и ВКВО-2015, г. Пермь), XV и XVI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (УМ-2014, г. Тюмень и УМ-2015, г. Красноярск), на XI Российском семинаре по волоконным лазерам (г. Новосибирск, 2014) и на семинаре Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications (Италия, г. Флоренция, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК в качестве изданий, рекомендуемых для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, 6 — в трудах международных и всероссийских конференций. Получено два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности.

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

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, двух приложений и списка литературы из 103 источников. Объем составляет 134 страницы, включая 42 рисунка и 3 таблицы.

Содержание работы

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

В **главе 1** дано краткое введение в проблематику задачи: представлена основная терминология и обзор литературы по теме диссертации. Описаны алгоритмы и модели, применяемые при численном моделировании передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи. Указаны основные эффекты, ограничивающие пропускную способность дисперсионных и солитонных линий связи. Изложены перспективы применения многоядерных волокон для увеличения скорости передачи данных в оптических линиях связи.

В **параграфе 1.1** описаны важнейшие этапы развития оптических линий связи и перечислены ключевые технологии, благодаря которым оптическая передача данных получила широкое распространение.

В **параграфе 1.2** описаны основные элементы волоконно-оптических линий связи, такие как передатчик, мультиплексор, детектор, а также модуль цифровой обработки сигнала. Подробно изложен принцип кодирования информации по значению фазы электромагнитного поля. Даны определения параметров, на основе которых проводилась оценка и изучение характеристик солитонных линий связи: понятие спектральной эффективности — отношения скорости передачи информации в частотном канале к ширине канала; коэффициента ошибки BER — отношения ошибочно принятых битов к общему числу переданных битов; отношения мощности сигнала к мощности шума — SNR . Описаны основные подходы к моделированию передачи данных по оптическому волокну, а также используемый в диссертационной работе численный метод расщепления по физическим процессам.

Основной моделью для описания распространения электромагнитного поля по световоду, применяемой в диссертационной работе, является нелинейное уравнение Шрёдингера для медленно меняющейся комплексной огибающей амплитуды:

$$i \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \gamma |E|^2 E + N(z, t), \quad (1)$$

где E — амплитуда электромагнитного поля, t — время, z — расстояние вдоль линии связи, β_2 — дисперсионный коэффициент, γ — нелиней-

ный коэффициент, $N(z, t)$ — шумовой член. Для описания усиления использована модель идеально распределённого усиления, соответствующая применению усиления, основанного на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния в реальных линиях связи. Для численного решения уравнения Шрёдингера использован симметричный метод расщепления, имеющий второй порядок точности по шагу h пространственной переменной z .

В параграфе 1.3 рассмотрены традиционные линии связи, в которых необходимо применение методов компенсации дисперсии. Изложены основные негативные эффекты, возникающие при распространении сигнала в оптических линиях связи данного типа: дисперсионное уширение, нелинейные эффекты и оптические потери. Показано негативное влияние нелинейных эффектов в традиционных волоконно-оптических линиях связи и их вклад в разрушение сигнала. Продемонстрировано ограничение роста спектральной эффективности и показана область применения традиционных линий связи.

В параграфе 1.4 рассмотрены солитонные линии связи, в которых для передачи информации используются солитоны — импульсы, способные сохранять форму благодаря взаимной компенсации дисперсионных и нелинейных эффектов. Описаны основные эффекты, возникающие в солитонных оптических линиях связи и приводящие к искажению сигнала: эффект межсолитонного взаимодействия, эффекты флуктуаций временного положения солитона и его фазы.

В параграфе 1.5 представлены основные направления исследований многоядерных волокон: поиск стационарных устойчивых решений, применение многоядерных волокон в области телекоммуникационных технологий, генерация световых пульс. Описана модель распространения электромагнитного поля по многоядерному волокну, указаны недостатки существующих алгоритмов поиска стационарных решений.

Глава 2 посвящена изучению эффектов взаимодействия спонтанного шума усилителей и солитонного оптического сигнала, приводящего к флуктуациям фазы и временного положения импульса на символьном интервале. Рассмотрены два метода подавления подобных флуктуаций: цифровая обработка сигнала и оптическая фильтрация. Проведён анализ эффективности и сравнение методов на основе значений дисперсии случайных отклонений фазы и положения импульса.

В параграфе 2.1 рассмотрен метод обратного распространения сигнала. Эта процедура представляет собой цифровую обработку принятого сигнала, а именно моделирование распространения сигнала в обратном направлении. При этом в качестве начального условия используется оцифрованный сигнал, пришедший на приемное устройство. Решается начально-краевая задача:

$$\begin{cases} -i\frac{\partial \hat{E}}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \hat{E}}{\partial t^2} - \gamma |\hat{E}|^2 \hat{E} \\ \hat{E}(0, z) = \hat{E}(T, z), \\ \hat{E}(t, 0) = E_L(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $E_L(t)$ — поле сигнала, детектированное на приемном устройстве.

Показано, что в солитонных линиях связи процедура обратного распространения сигнала способна привести к подавлению величины временных и фазовых флуктуаций параметров импульса до 40%, при этом оптимальное значение «виртуальной» длины распространения составляет половину фактической длины линии связи, $L_b = L/2$.

Пример оптимизации линии связи приведен на рисунке 1, для фиксированных расстояний распространения $L_i = 5, 10, 15$ и 20 тыс.км. Чёрными прямоугольниками показан рост величины временных флуктуаций σ_τ во время «физического» (прямого) распространения сигнала по солитонной линии связи. Кривая является общей для всех выбранных L_i . Цветными символами представлены данные цифровой обработки сигнала на приёмнике, ось абсцисс представляет собой сумму «физического» (черные символы) и «виртуального» (цветные символы) распространения. Для каждого из L_i процедура обратного распространения сигнала проводилась на то же расстояние L_i .

Приведённые результаты свидетельствуют о том, что флуктуации параметров солитонного импульса зависят не только взаимодействия шума усилителей и оптического сигнала, но также и от межсолитонного взаимодействия. Процедура обратного распространения сигнала не компенсирует случайный характер временных и фазовых искажений, но способна снизить вклад взаимного притяжения и отталкивания солитонных импульсов.

В параграфе 2.2 исследована эффективность применения метода оптической фильтрации в солитонных линиях связи. Представлены численные результаты оптимизации расстояния между фильтрами и ширины фильтра. Найдена область значений параметров, при которых фазовые и временные флуктуации минимальны. Проведено сравнение эффективно-

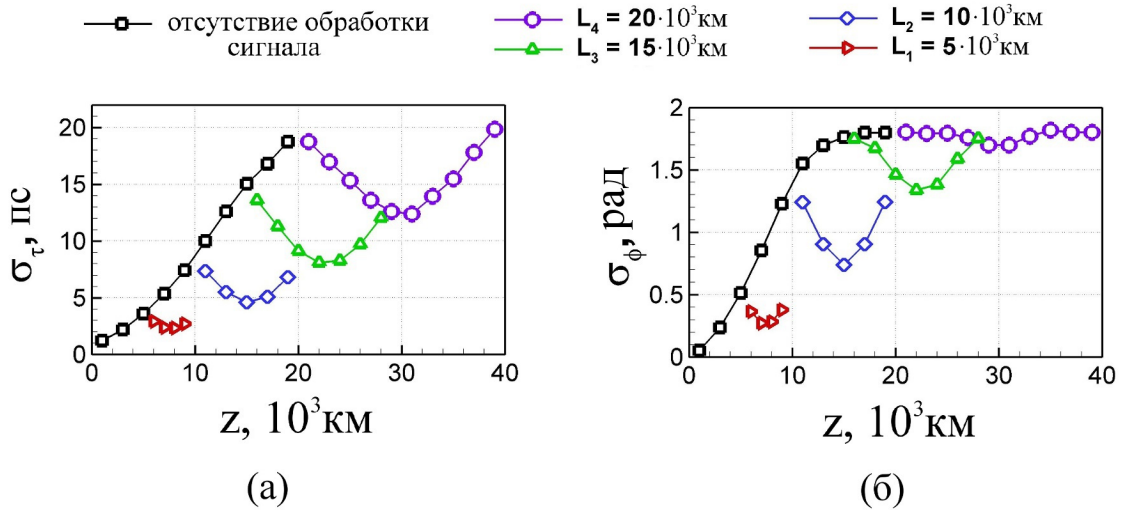


Рисунок 1 — Оптимизация процедуры обратного распространения сигнала в солитонных линиях связи: значения (а) временных и (б) фазовых флуктуаций.

сти применения методов обратного распространения сигнала и оптической фильтрации. Результаты представлены на рисунке 2. Численное моделирование показало, что на магистральных расстояниях распространения до 4000 км эффективность процедур отличается незначительно. Однако на трансокеанских расстояниях 6000 км и более применение оптической фильтрации более эффективно вследствие снижения общего уровня шума в системе.

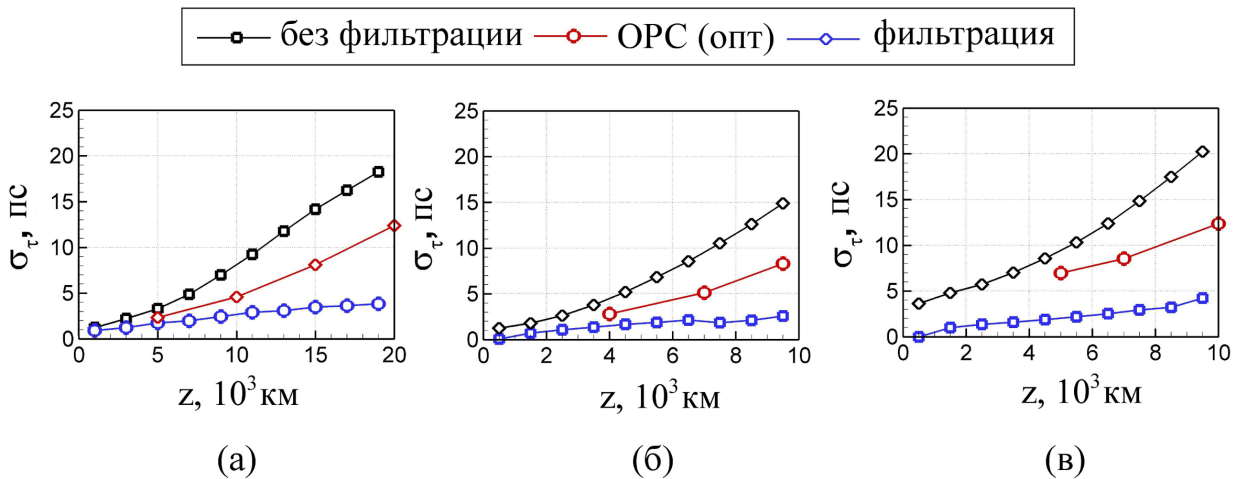


Рисунок 2 — Сравнение эффективности процедуры обратного распространения сигнала и оптической фильтрации в задаче подавления временных флуктуаций для волокон (а) DSF, (б) TWF и (в) SSMF.

Проведена оценка максимальной дальности передачи информации в солитонных оптических линиях связи с использованием оптической фильтрации, при которой возможно безошибочное декодирование сигнала. Рассмотрены три типа волокон DSF, TWF и SSMF со значением коэффициента дисперсии соответственно 0.5, 4 и 17 пс/нм/км. Для фазовых форматов модуляции различного порядка (BPSK, QPSK и 8-PSK) проведено моделирование распространения сигнала в линии связи. Максимальное расстояние распространения определено как наибольшее расстояние, при котором значение коэффициента ошибки BER менее порогового $2 \cdot 10^{-2}$. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Максимальное расстояние безошибочной передачи данных для различных форматов модуляции и типов волокон

	DSF	TWF	SSMF
BPSK	14 тыс.км.	16 тыс.км.	> 20 тыс.км.
QPSK	9 тыс.км.	10 тыс.км.	20 тыс.км.
8-PSK	3.5 тыс.км.	3.5 тыс.км.	12 тыс.км.

Глава 3 посвящена проведению оптимизации параметров модуляции в солитонных линиях связи для достижения максимальной спектральной эффективности. Проведён анализ режимов работы солитонных когерентных линий связи и сравнение традиционных и солитонных линий связи.

В параграфе 3.1 рассмотрена когерентная солитонная передача данных с использованием кодировки информации по значению фазы импульса. Разработан комплекс программ для моделирования генерации и детектирования фазово-модулированного сигнала. Для оценки максимально допустимого порядка модуляции использовался непрерывный формат кодирования по фазе, когда значение фазы импульса является непрерывной случайной величиной с равномерным распределением в диапазоне $[0; 2\pi]$.

Проведена оптимизация, результатами которой стали рекомендации выбора ширины импульса T_{FWHM} и межканального расстояния $\Delta\nu_{ch}$:

$$T_{FWHM} = T_s / 1.7, \quad \Delta\nu_{ch} = 2.36 / T_{FWHM}, \quad (3)$$

где T_s — значение символьного интервала.

В параграфе 3.2 рассмотрена задача оптимизации параметров комбинированной модуляции, когда для кодировки информации используется

значение фазы и положение импульса на символьном интервале. Разработан комплекс программ для генерации и детектирования сигнала комбинированной модуляции, включающий в себя непрерывный двумерный формат кодирования для оценки максимально достижимой спектральной эффективности.

Проведена оптимизация параметров комбинированной модуляции, результатами которой стали рекомендации выбора параметров системы:

$$T_{FWHM} = 0.3 T_s, \quad \Delta\nu_{ch} = 2.36 / T_{FWHM}, \quad T_{GB} = 0.5 T_s, \quad (4)$$

где T_{GB} — защитный интервал, то есть минимальное расстояние между максимумами соседних импульсов. Показано, что применение дополнительной модуляции по положению импульса в солитонных линиях связи приводит к увеличению спектральной эффективности на 0.7 бит/с/Гц.

Далее проведено сравнение традиционных линий связи, в которых выполняется компенсация дисперсионных эффектов, и солитонных линий связи. На рисунке 3 (а) представлена зависимость спектральной эффективности от параметра спектральной плотности мощности PSD — отношения средней мощности, вводимой в волокно, к ширине частного канала. Видно, что в области больших мощностей, где влияние нелинейных эффектов велико, спектральная эффективность традиционных линий связи быстро падает. Однако солитонные линии связи все ещё способны поддерживать высокие порядки модуляции и значение спектральной эффективности более 3 бит/с/Гц.

На рисунке 3 (б) представлена зависимость производительности S_L от параметра SNR , где S_L определено как произведение спектральной эффективности на максимальную дальность линии связи, при которой возможно безошибочное детектирование сигнала. Видно, что характер кривых качественно совпадает, однако солитонные линии связи обладают преимуществом в 6 дБ, то есть при использовании солитонных технологий возможна безошибочная передача информации на большие расстояния или с большей скоростью.

Глава 4 посвящена исследованию стационарных решений системы уравнений, описывающей распространение электромагнитного поля по многоядерному волокну. Данный тип уравнений подходит для волокон с центрально-осевой симметрией, когда рассматривается центральное ядро, окружённое периферическими ядрами. Было найдено приближенное аналитическое решение системы, а также разработан двухуровневый итера-

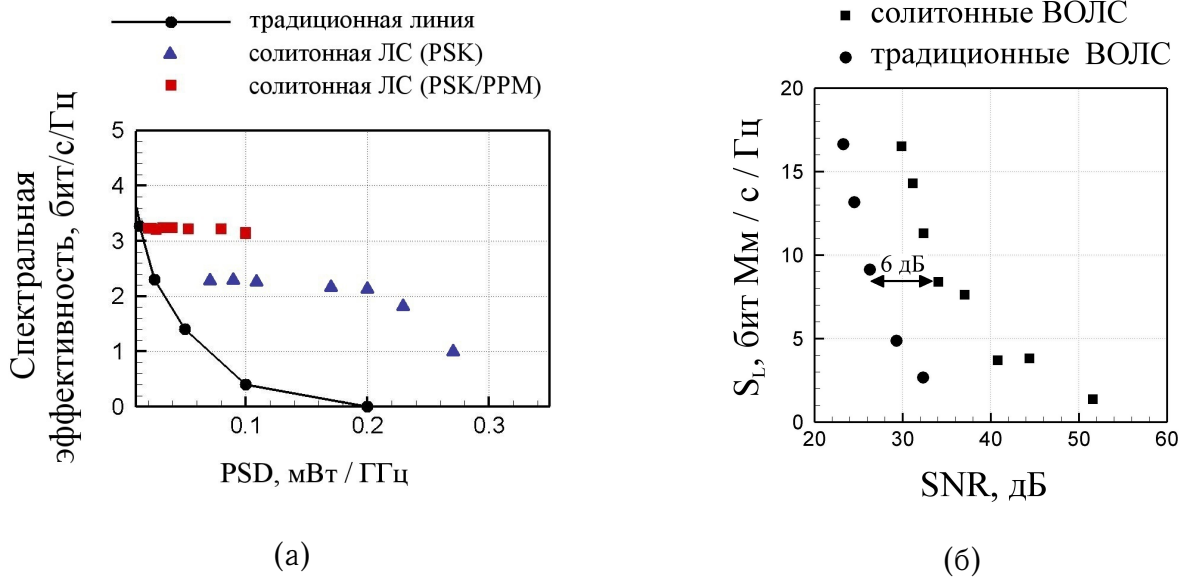


Рисунок 3 — Сравнение традиционных и солитонных линий связи: (а) зависимость спектральной эффективности от параметра PSD , (б) зависимость производительности от параметра SNR .

ционный алгоритм нахождения численного стационарного решения. Проведено сравнение численного и аналитического решений.

В параграфе 4.1 рассмотрена система неинвариантных уравнений для поиска стационарных решений в многоядерных волокнах центрально-симметричной структуры. Вследствие симметрии системы стационарное решение состоит из одинаковых импульсов u_1 на периферии и центрального импульса u_0 .

$$\begin{cases} -\lambda^2 u_0 + \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} + 2\frac{\gamma_0}{\gamma_1} N_c |u_0|^2 u_0 + u_1 = 0, \\ -\lambda^2 u_1 + \frac{D_1}{D_0} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + 2|u_1|^2 u_1 + u_0 + \kappa u_1 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где λ — параметр системы, имеющий физический смысл константы распространения, D_i — коэффициенты дисперсии, γ_i — коэффициенты нелинейности, N_c — количество ядер на периферии, κ — коэффициент системы, зависящий от коэффициентов взаимодействия между ядрами.

Для системы уравнений (5) найдено два стационарных аналитических приближенных решения. Первое описывает распределенное по мощности решение, для которого в каждом из ядер многоядерного волокна распространяются импульсы мощности одного порядка. Решение записывается в виде:

$$u_i = P_i(\lambda) \operatorname{sech}(\rho_i(\lambda)t) \exp(i\lambda^2 z), \quad P_i = \sum_{k=1}^{k=-5} \alpha_k^i \lambda^k \quad (6)$$

Далее найдено локализованное по времени и пространству приближенное аналитическое стационарное солитонное решение в виде:

$$u_i = P_i(\lambda) f_i(\rho_i(\lambda)t) \exp(i\lambda^2 z), \quad (7)$$

$$P_0 = \sum_{k=1}^{k=-5} \alpha_k^0 \lambda^k, \quad f_0 = \operatorname{sech}(\rho_i(\lambda)t), \quad (8)$$

$$P_1 = \sum_{k=-1}^{k=-5} \alpha_k^1 \lambda^k, \quad f_1 = e^{-\lambda t} \ln(1 + e^{2\lambda t}) + e^{\lambda t} \ln(1 + e^{-2\lambda t}). \quad (9)$$

Коэффициенты α_k^i найдены методом неопределённых коэффициентов, ρ_i — из условия взаимной компенсации дисперсионных и нелинейных эффектов волокна.

В параграфе 4.2 построен двухуровневый итерационный метод для численного поиска стационарных решений уравнения (5). Для построения алгоритма сделан переход в Фурье-пространство, и начальная система уравнений выписана в матричном виде:

$$M \vec{u} = \vec{v}, \quad \text{где} \quad M = \begin{pmatrix} \frac{\lambda^2}{2N_c} \frac{\gamma_1}{\gamma_0} + \frac{\gamma_1}{2N_c \gamma_0} \omega^2 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda^2}{2} + \frac{D_1}{2D_0} \omega^2 - \frac{\kappa}{2} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_0 \\ \tilde{u}_1 \end{pmatrix}, \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} N(\tilde{u}_0) + \frac{\gamma_1}{2N_c \gamma_0} \tilde{u}_1 \\ N(\tilde{u}_1) + \frac{u_0}{2} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

где $N(\tilde{u}_i) = F(|u_i|^2 u_i)$ — преобразование Фурье от нелинейного члена уравнения. Внешний цикл итераций основан на методе бисекции, в котором итерации будут сходиться к решению ненулевой энергии. Внутренний цикл итераций необходим для уточнения формы решения.

На первом этапе согласно заданным начальным условиям выбираются границы интервала значений энергии E_{min} и E_{max} , на котором осуществляется дальнейшее уточнение энергии решения. Рассчитывается среднее значение энергии на интервале E_M . Внешний итерационный процесс заключается в установлении значений полной энергии системы на $(k+1)$ -м шаге $E_{tot}^{(k+1)}$ и энергии E_M : если $E_{tot}^{(k+1)} - E_M > 0$, то интервал $[E_{min}; E_{max}]$ сужается до интервала $[E_{min}; E_M]$; если $E_{tot}^{(k+1)} - E_M < 0$, то далее используется интервал $[E_M; E_{max}]$. Таким образом формируется сходящаяся последовательность $E_{tot}^{(k+1)}$. Итерации продолжаются до удовлетворения условия: $|E_{tot}^{(k+1)} - E_M| / E_M < 10^{-10}$.

Внутренние итерации имеют вид

$$\vec{u}^{(k+1)} = \left(\frac{E_M}{\int |M^{-1} \vec{v}^{(k)}|^2 dt} \right)^{1/2} M^{-1} \vec{v}^{(k)}. \quad (12)$$

Стоит отметить, что на каждом шаге внутренних итераций происходит перенормировка значения энергии полученного решения. Еще одним важным замечанием является расчет вектора $\vec{v}^{(k)}$ в правой части (12). Итерационный метод работает в Фурье-пространстве, однако для вычислений значения нелинейной части $N(u_i) = |u_i|^2 u_i$ необходимо сделать переход во временное пространство. Таким образом, для системы инвариантных уравнений разработанный алгоритм будет работать медленнее, чем известные итерационные алгоритмы, такие как метод простых итераций или метод Петвиашвили. Однако в задачах поиска стационарных решений систем неинвариантных уравнений данный метод позволяет найти решение из любого семейства.

В параграфе 4.3 проведен качественный и количественный анализ разработанного алгоритма. Проведено сравнение численного и приближенного аналитического решений. Рассчитанное значение относительной ошибки составило 10^{-3} . На рисунке 4 (а) представлены результаты численного расчета установления энергии системы в зависимости от номера внешней итерации. На рисунке 4 (б) показана сходимость алгоритма в виде зависимости невязки от номера внешней итерации.

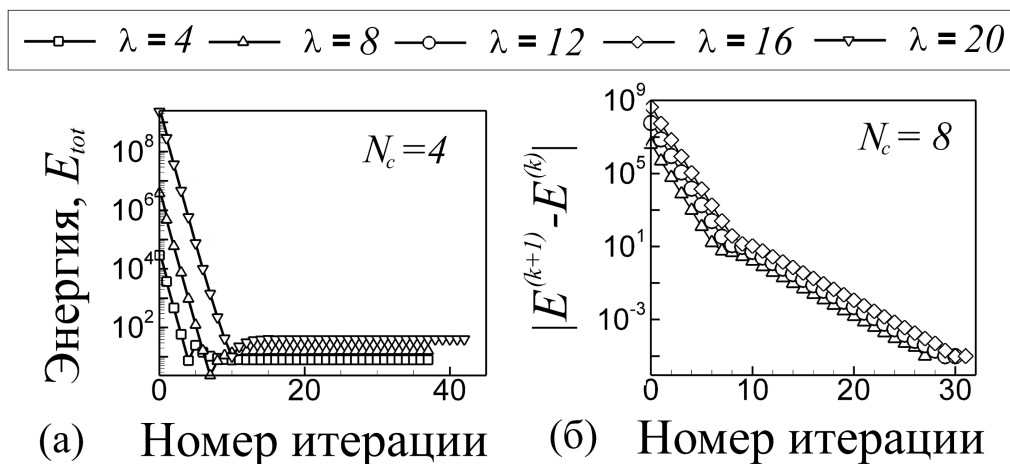


Рисунок 4 — Верификация разработанного алгоритма: (а) установление значения полной энергии системы, (б) уменьшение значения невязки с ростом номера внешней итерации.

Рассчитана зависимость полной энергии системы и функции Гамильтона от параметра λ . Продемонстрирована устойчивость локализованного решения согласно критерию Вахитова-Колоколова. Отрицательное значение функции Гамильтона свидетельствует об отсутствии коллапса решения в многоядерных волокнах.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Проведена оптимизация методов обратного распространения сигнала и оптической фильтрации для подавления случайных флуктуаций параметров солитонов. Показано, что при использовании процедуры обратного распространения сигнала для эффективной компенсации временных и фазовых флуктуаций необходимо выбирать «виртуальную» длину распространения равную половине фактической длины линии связи. Для задач оптической фильтрации найдена область значений параметров ширины фильтра k и расстояния между фильтрами L_a , которые обеспечивают наименьшее накопление фазовых и временных флуктуаций.

2. Показано, что цифровая обработка сигнала способна снизить флуктуации параметров солитона на 40%. Продемонстрировано, что на магистральных расстояниях эффективность методов различается несущественно. На трансокеанских расстояниях применение метода оптической фильтрации более эффективно вследствие общего снижения шума в системе и позволяет снизить величину флуктуаций до 4-х раз.

3. Проведена оптимизация параметров модуляции солитонного сигнала для кодировки информации по фазе импульса, а также для смешанного типа кодировки по фазе и положению импульса для достижения максимальной спектральной эффективности солитонных линий связи.

4. Создан комплекс программ для моделирования генерации и декодирования солитонного сигнала с различным типом модуляции.

5. На основе рассмотренной магистральной линии связи проведено сравнение традиционной и солитонной передачи сигнала. Показано, что в области нелинейных режимов солитонный формат передачи данных позволяет передавать информацию с бóльшей скоростью, либо на бóльшие расстояния.

6. Разработан двухуровневый итерационный численный алгоритм для нахождения стационарного локализованного пространственно-временного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающей распространение электромагнитного поля в многоядерном волокне центрально-симметричной структуры. Проведено сравнение численного и аналитического решений.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Юшко О.В., Наний О.Е., Редюк А.А., Трещиков В.Н., Федорук М.П. Численное моделирование действующих экспериментальных DWDM-линий связи с канальной скоростью 100 Гбит/с // Квантовая электроника, том 45, № 1, стр. 75–77, 2015.

2. Юшко О.В., Редюк А.А. Солитонные линии связи на основе спектрально-эффективных форматов модуляции // Квантовая электроника, том 44, № 6, стр. 606–611, 2014.

3. Yushko O., Redyuk A., Fedoruk M., Blow K.J., Doran N.J., Ellis A.D., Turitsyn S. Timing and phase jitter suppression in coherent soliton transmission // Optics Letters, Vol. 39 (21), P. 6308–6311, 2014.

4. Юшко О.В., Редюк А.А., Федорук М.П., Турицын С.К. Когерентные солитонные линии связи // Журнал теоретической и экспериментальной физики, том 146, № 5, стр. 899–908, 2014.

5. Юшко О.В. Итерационный алгоритм поиска стационарных решений в многоядерных волокнах // Вычислительные технологии, том 4, 2016.

Публикации в трудах международных и всероссийских конференций:

1. Yushko O., Redyuk A., Doran N.J., Blow K.J., Ellis A.D., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. Digital backward propagation in coherent soliton transmission // Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications, Italy, Florence. – 2015.

2. Юшко О.В., Редюк А.А., Федорук М.П., Турицын С.К. Преимущества солитонной когерентной передачи данных на большие расстояния // Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике, Пермь. – 2015. – стр. 36.

3. Юшко О.В. Моделирование шума усилителей в нелинейном режиме распространения оптического сигнала в волоконных линиях связи // Тезисы докладов XVI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Красноярск. – 2015. – стр. 59.

4. Юшко О.В. Математическое моделирование шумовых эффектов в солитонных волоконно-оптических линиях связи // Тезисы докладов XV Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, Тюмень. – 2014. – стр. 57.

5. Юшко О.В., Редюк А.А., Федорук М.П., Турицын С.К. Математическое моделирование солитонных волоконно-оптических линий связи //

Материалы XI Российского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск. – 2014. – стр. 107.

6. Юшко О.В., Редюк А.А., Федорук М.П., Турицын С.К. Математическое моделирование солитонных волоконно-оптических линий связи на основе спектрально-эффективных форматов модуляции // Труды Всероссийской конференции по волоконной оптике, Пермь. – 2013. – стр. 102.

Государственная регистрация программ ЭВМ:

1. Юшко О.В., Редюк А.А., Федорук М.П. Свидетельство № 2013619513 о государственной регистрации программного комплекса для обработки фазово-модулированных оптических сигналов «DSPO-1», М: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2013 г.

2. Юшко О.В., Редюк А.А., Федорук М.П. Свидетельство № 2015610486 о государственной регистрации программного комплекса для моделирования солитонных линий связи «PPMSol-1», М: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2015 г.

Список цитируемой литературы:

1. Дианов Е.М. От тера-эры к пето-эре // Вестник РАН. — 2000. — Т. 70(11). — С. 1010–1015.

2. 26 Tbit/s linerate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing / D. Hillerkuss, R. Schmogrow, T. Schellinger et al. // Nature Photonics. — 2011. — Vol. 5(6). — P. 364–371.

3. Single-laser 32.5 Tbit/s 16QAM Nyquist WDM transmission / D. Hillerkuss, R. Schmogrow, M. Meyer et al. // Journal of Optical Communications and Networking. — 2012. — Vol. 4. — P. 715–723.

4. Capacity limits of optical fiber network / R. Essiambre, G. Kramer, P. Winzer, B. Goebel // Journal of Lightwave Technology. — 2010. — Vol. 28. — P. 662–701.

5. Trans-oceanic class ultra-long-haul transmission using multi-core fiber / I. Morita, K. Igarashi, H. Takahashi et al. // Optics Express. — 2014. — Vol. 22(26). — P. 31761–31773.