

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Юшко Олеси Викторовны *«Математическое моделирование солитонных оптических линий связи на основе новых форматов и технологий передачи данных»*, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы исследований.

В последнее десятилетие основой для увеличения скорости передачи данных в волоконных линиях связи послужило мощное развитие новых технологий, направленных на подавление нежелательных эффектов волокна, приводящих к деградации оптического сигнала. Например, технологии плотной упаковки спектральных каналов для эффективного использования пропускной полосы оптоволокна, специальных кодов для подавления паттерн-эффектов. Тем не менее, в настоящее время рынок телекоммуникаций испытывает кризис, а современные линии связи уже не способны удовлетворить экспоненциально растущий спрос на скорость передачи данных. Метод дальнейшего повышения пропускной способности оптических линий связи, рассмотренный в диссертации, заключается в использовании солитонов в качестве импульсов, переносящих информацию. При этом используются комбинированные форматы модуляции, где кодировка происходит по двум или более параметрам: например, фазе и амплитуде, или фазе и положению импульса на символьном интервале. Кроме того, рассмотрены многоядерные волокна, которые выступают в роли перспективной разработки нового поколения оптических линий связи.

Целью представленной диссертационной работы является исследование преимуществ применения солитонных технологий в волоконно-оптических линиях связи, а также исследование локализованных стационарных решений формы гиперболического секанса в многоядерных световодах. В ходе выполнения диссертационной работы разработана математическая модель, используемая в исследовании нелинейных искажений сигнала, возникающих при распространении сигнала в волоконно-оптических солитонных линиях связи. Создан комплекс программ для моделирования генерации, распространения и детектирования сигнала с фазовой и комбинированной модуляцией. Исследовано влияние современных методов обработки сигнала в применении к солитонным линиям связи. Оптимизированы режимы работы солитонных волоконно-оптических линий связи. Разработан численный алгоритм для поиска стационарных решений и найдены стационарные решения системы уравнений, описывающей распространение электромагнитного поля в многоядерных световодах центрально-симметричной структуры.

Данная работа актуальна и имеет практическую значимость, поскольку очень востребована при проведении научных исследований по оптимизации режимов работы солитонных волоконно-оптических линий связи для достижения максимальной спектральной эффективности, по исследованию предельных значений дальности и скорости передачи данных, исследованию современных методов обработки сигналов. Содержание и область исследований диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.18.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы из 103 наименований. Работа изложена на 134 страницах и содержит 42 рисунка и 3 таблицы.

Во введении описывается область исследований, обосновывается актуальность, определяются цели и задачи, формулируется новизна и значимость работы, излагается краткое содержание работы по главам, приводится список публикаций и представление работы, и формулируются защищаемые положения.

В Главе 1 представлено введение в диссертационную работу: приведена краткая историческая справка о развитии оптоволоконных технологий, подробно описаны основные элементы оптических линий связи, такие как передатчик, мультиплексор, детектор, модуль цифровой обработки сигнала. Также подробно изложен принцип кодирования информации по значениям фазы электромагнитного поля. Приведено подробное описание математической модели, использованной в диссертационной работе, где для описания распространения электромагнитного поля по световоду используется нелинейное уравнение Шредингера с добавлением члена, описывающего шумовую добавку ВКР-усиления. Подробно изложен численный метод расщепления по физическим процессам.

В главе рассмотрены традиционные дисперсионные линии связи и описаны основные негативные эффекты, вносящие вклад в искажение сигнала: дисперсионное уширение, нелинейные эффекты и оптические потери. Продемонстрировано, что с ростом мощности сигнала в линиях связи данного типа наблюдается снижение спектральной эффективности, а значит дальности и скорости передачи информации. Далее рассмотрены солитонные линии связи и основные негативные эффекты, характерные для солитонной передачи сигнала: эффект межсолитонного взаимодействия и возникновение флуктуаций временного положения и фазы солитонного импульса.

Заключительный параграф главы посвящен краткому обзору способов применения многоядерных волокон в задачах волоконной оптики. Указаны недостатки существующих численных алгоритмов поиска стационарных решений и обоснована необходимость разработки новых итерационных алгоритмов.

В Главе 2 исследованы солитонные волоконно-оптические линии связи, характеризующиеся различным коэффициентом дисперсии: SSMF, TWF и DSF (17, 4 и 0.5 пс/нм/км соответственно). Рассмотрены два метода подавления временных и фазовых флуктуаций в подобных линиях связи: метод обратного распространения сигнала и оптическая фильтрация. Проведена численная

оптимизация вышеупомянутых методов. Показано, что применение метода обратного распространения сигнала на приемнике линии связи позволяет подавить временные и фазовые флуктуации до 40%, а применение оптических фильтров – до четырех раз. Численные результаты говорят о том, что применение фильтрации для компенсации фазовых и временных флуктуаций более эффективно, чем цифровая процедура обратного распространения сигнала. Это объясняется тем, что фильтры снижают общий уровень шума в системе. Также для каждого из рассматриваемых типов волокон были определены пределы безошибочной передачи данных для различных фазовых форматов модуляции. Например, для DSF волокна возможна передача данных со скоростью 10 Гбит/с на расстояния порядка 14 тыс. км, 20 Гбит/с — 9 тыс. км, и 30 Гбит/с — 3.5 тыс. км.

В *Главе 3* были рассмотрены многоканальные когерентные солитонные волоконно-оптические линии связи протяженностью 2000 км. Рассматривалась солитонная передача сигнала с использованием фазовой модуляции, а также с использованием комбинированного формата модуляции — как по фазе, так и по положению импульса на символьном интервале. С помощью численного моделирования определен максимальный порядок модуляции сигнала, при использовании которого возможна безошибочная декодировка сигнала на фиксированном расстоянии. Проведена оптимизация солитонных линий связи по параметрам модуляции и ширины импульса для достижения максимальной спектральной эффективности. В ходе работы было выделено три режима работы солитонных волоконно-оптических линий связи:

1. Первый режим подразумевает использование широких солитонов, а значит шумовые эффекты и межсолитонное взаимодействие не играют значительной роли. В данном режиме рост спектральной эффективности возможен лишь за счет добавления модуляции по другим параметрам импульса, например, по положению, амплитуде или частоте.

2. Второй режим работы солитонных линий связи определяется значительным влиянием межсолитонного взаимодействия, когда эффекты Гордона-Хауса и Гордона-Молленауэра все ещё не играют значительной роли, поскольку мощность накопленного шума мала. В данном режиме процедура обратного распространения сигнала может полностью скомпенсировать эффект взаимодействия солитонов, а значит увеличение спектральной эффективности и/или дальности линии связи возможно за счет совместного применения методов цифровой обработки сигнала и комбинированной модуляции сигнала.

3. Третий режим включает все негативные эффекты солитонной передачи сигнала: как взаимодействие импульсов, так и шумовые эффекты. Случайные флуктуации временного положения и фазы импульса не возможно полностью подавить; здесь достигается предел роста спектральной эффективности для линии связи рассмотренной конфигурации.

В заключении главы проведено сравнение традиционных дисперсионных и солитонных линий связи в области высоких значений отношения сигнал/шум. Показано, что солитонные линии связи обладают преимуществом в 6 дБ.

В Главе 4 решена задача о поиске стационарного локализованного по времени и пространству решения для системы уравнений, описывающей динамику света в многоядерном волокне центрально-симметричной структуры. Найдено два типа приближенных аналитических стационарных решений для подобных систем: решение с энергией, распределенной по ядрам, и энергией, сконцентрированной в центральном ядре. Представлен численный алгоритм поиска стационарных решений. Алгоритм представляет собой двухуровневый итерационный процесс. Цикл внешних итераций основан на методе дихотомии и необходим для поиска решения из определенного семейства. Цикл внутренних итераций направлен на установление огибающей решения. Основной особенностью предложенного алгоритма является корректировка энергии решения во внешнем итерационном процессе. Далее показано хорошее качественное и количественное согласование численных и аналитических решений. Кроме того, проведен анализ устойчивости 2-х описанных семейств стационарных решений, основанный на выполнении критерия Вахитова-Колоколова и значения функции Гамильтона.

В заключении сформулированы основные результаты работ.

Обоснованность и достоверность полученных результатов

Обоснованность и достоверность диссертационного исследования основывается на использовании строгих математических методов, а также подтверждается хорошим качественным и количественным согласованием полученных Юшко О.В. результатов с известными теоретическими подходами, а также численными результатами других авторов.

Новизна диссертационной работы

Впервые разработан численный алгоритм поиска стационарных решений нелинейной связанной системы уравнений для задач волоконной оптики. Впервые проведено полное исследование спектральной эффективности солитонных линий связи, в том числе проанализированы режимы распространения сигнала и проведено сравнение с современными форматами передачи данных. Впервые рассмотрены современные методы обработки данных – метод обратного распространения сигнала – в контексте солитонной передачи данных.

Научная и практическая значимость основных положений диссертации:

К наиболее интересным и практически важным результатам, изложенным в диссертации, следует отнести:

1. Оптимизация методов подавления флуктуаций параметров импульса: цифрового метода обратного распространения сигнала и метода оптической фильтрации. Показано, что при использовании процедуры обратного распространения сигнала для эффективной компенсации временных и фазовых флуктуаций необходимо выбирать значение параметра “виртуальной” длины распространения, равное половине фактической длины линии связи. Для задач оптической фильтрации найдена область параметров ширины фильтра и расстояния между фильтрами, которые обеспечивают наименьшее накопление фазовых и временных флуктуаций.

2. Результаты сравнительного анализа двух методов подавления случайных флуктуаций: метода цифровой обработки сигнала и метода оптической фильтрации. Численные исследования показали, что на магистральных расстояниях распространения наличие фильтров в системе можно заменить цифровой процедурой обработки сигнала на приемнике. Однако, для трансокеанских расстояний распространения применение оптической фильтрации позволяет эффективней подавлять временные и фазовые колебания.

3. Результаты оптимизации параметров модуляции сигнала для кодировки информации по фазе импульса, а также для смешанного типа кодировки по фазе и положению импульса.

4. Результаты сравнения традиционной и солитонной передачи сигнала. Показано, что в области нелинейных режимов солитонный формат передачи данных позволяет передавать информацию с большей скоростью, либо на большие расстояния.

6. Двухуровневый итерационный численный алгоритм для нахождения стационарного локализованного пространственно-временного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих распространение электромагнитного поля в многоядерном волокне центрально-симметричной структуры.

Результаты работы могут быть рекомендованы к применению в ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ФГБУН НЦВО РАН, ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и других организациях как в научных, так и в прикладных целях.

Замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В тексте диссертации присутствуют некоторые стилистические ошибки. Например, на стр. 31 автор пишет: «Последовательность импульсов уже не будет являться решением уравнения Шредингера...». Здесь необходимо уточнить, что последовательность импульсов не будет являться аналитическим решением. Аналогичное предложение присутствует на стр. 47.

2. В работе присутствует ряд неточностей: на стр. 38 не хватает ссылки на формулу (30), на рисунке 29 не указана размерность величин, в формуле (81) используются обозначения, расшифрованные только на следующей странице.

3. В разделе 1.3 написано, что при использовании метода расщепления по физическим процессам численный шаг необходимо выбирать аккуратно, однако нигде не описано, как выбиралось значение численного шага при расчетах.

4. В Главе 2 при исследовании шумов на больших расстояниях необходимо также учитывать искажения сигнала, вносимые в систему «физическими» случайными колебаниями, такими как растяжение волокна, флуктуации температуры и пр.

5. В Главе 3 проведена оптимизация солитонных линий связи для фиксированного расстояния распространения 2000 км. Однако, исследование было бы более полным, если бы автор также рассмотрел зависимость спектральной эффективности от расстояния распространения.

Указанные замечания не снижают высокий уровень работы и ценность полученных автором результатов.

Заключение о работе

Диссертационная работа О.В. Юшко является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме и вносит существенный вклад в разработку и адаптацию математических моделей и создание комплекса программ для моделирования, расчета и исследования солитонных оптических линий связи на основе новых форматов и технологий передачи данных.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы отчётливо. Полученные результаты, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы, являются новыми и их достоверность не вызывает сомнений. В ходе работы над диссертацией О.В. Юшко опубликовала 11 работ, среди них пять статей опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, шесть – в трудах международных и всероссийских конференций. Получены два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. В данных публикациях материалы диссертации изложены достаточно полно. Следует отметить хорошее оформление диссертации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация Юшко О.В. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в п. 9-11, 13-14 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам соискатель заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент

Зам. директора по научной работе
Института лазерной физики СО РАН
к.ф.-м.н.

Денисов Владимир Иванович

Почтовый адрес: г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 13/3, 630090
Рабочий телефон: (383) 330 77 33
E-mail: denisov@laser.nsc.ru

25 августа 2016 г.

Подпись В.И. Денисова заверяю
Ученый секретарь
Института лазерной физики СО РАН
к.ф.-м.н.

Покасов Павел Викторович