

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Сидельникова Олега Сергеевича «Математическое моделирование нелинейного распространения оптического сигнала в высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линиях связи», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертация Олега Сергеевича Сидельникова посвящена численному моделированию нелинейного распространения сигнала в линиях связи на основе многомодовых волоконных световодов со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления с целью повышения их пропускной способности. Разработан эффективный численный метод моделирования сигнала, распространяющегося в нескольких модах многомодового волокна, изучено влияние нелинейных эффектов при распространении сигнала в режимах сильной и слабой связи мод, а также рассмотрена компенсация нелинейных искажений с использованием адаптивной модуляции и схемы обработки сигнала, основанной на динамических нейронных сетях.

Актуальность работы. В связи с возросшим объемом общемирового информационного трафика в последнее время актуальной задачей является увеличение пропускной способности современных волоконно-оптических линий связи. Для этой цели разрабатываются различные методы модуляции и уплотнения сигналов, которые в дальномагистальных системах, основанных на одномодовом волокне, задействуют все имеющиеся степени свободы - время, частоту, фазу и поляризацию излучения. Дальнейшее увеличение пропускной способности линий связи может осуществляться за счет пространственного разделения каналов в световоде. Здесь преимуществом обладают многомодовые волокна. Так как активное исследование многомодовых систем связи началась недавно, а проведение экспериментальных исследований в этом направлении не всегда возможно или затратно, актуальной задачей остается математическое моделирование физических процессов при передаче данных в таких сложных технологических системах и их оптимизация. Особенно стоит отметить разработку эффективных численных методов и вычислительных технологий для решения данной задачи.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 118 наименований и приложения.

Во введении обосновывается актуальность, определяются цели и задачи, формулируются защищаемые положения, подчеркивается новизна и практическая значимость работы, указывается апробация результатов, и излагается краткое содержание работы по главам.

В Главе 1 изложены основы математического моделирования многомодовых волоконно-оптических линий связи. Вначале приводятся исторические этапы использования света для передачи информации – от дыма костра до современных ВОЛС с пространственным уплотнением каналов. Далее описываются основные модели нелинейного распространения сигнала в волокне – нелинейное уравнение Шредингера (НУШ), уравнение Манакова в режиме слабой или сильной связи мод многомодового волокна, и сравниваются численные методы для решений уравнений распространения излучения – метод расщепления по физическим процессам с использованием преобразования Фурье на линейном шаге и конечно-разностные методы. Также подроб-

но рассматривается структура системы передачи данных: передатчик с различными форматами модуляции сигнала; канал, состоящий из оптического волокна двух типов – многомодового со ступенчатым или градиентным профилем показателя преломления, а также ряда волоконных эрбиевых усилителей; приемник, в котором компенсируется хроматическая дисперсия, нелинейные искажения и вычисляется коэффициент битовых ошибок. В конце главы сравниваются нелинейные эффекты в режиме сильной и слабой связи мод в многомодовых волокнах.

В *Главе 2* подробно рассматривается численный метод расщепления по физическим процессам с использованием преобразования Фурье на линейном шаге, который популярен для решения уравнений волоконной оптики. Однако он весьма трудозатратен для многомодовых волокон, поэтому автором выводится компактная схема повышенного порядка точности $O(h^2 + \tau^4)$ для решения уравнения Манаква в режиме слабой связи и проверяется ее устойчивость. Предложенная схема обладает высокой эффективностью распараллеливания, а ее сложность при увеличении числа мод растет намного медленнее $O(M)$, чем в методе расщепления $O(M^3)$. Однако она уступает методу расщепления в точности расчета на фиксированной сетке по временной переменной. В главе также сравниваются численные решения, полученные с помощью метода расщепления и компактной схемы, с точными решениями скалярного НУШ для одного солитона и связанного НУШ для двух поляризационных компонент. Также показано, что компактная схема уже при четырех модах волокна опережает метод расщепления по времени вычисления.

Глава 3 посвящена изучению влияния нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых системах связи. Вначале было проведено сравнение режимов сильной и слабой связи мод в системах, основанных на многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Здесь слабая связь мод обеспечивала лучшее качество передачи данных благодаря меньшему нелинейному взаимодействию сигналов, распространяющихся в разных модах волокна. Также было показано, что в режиме сильной связи качество передачи данных ухудшается с увеличением количества мод. Далее расчеты проводились для многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления в режиме слабой связи мод. В этом случае качество передачи данных улучшалось с ростом числа мод. Для обоснования этого результаты отдельно было исследовано влияние нелинейных эффектов на сигнал в моде LP₀₁ при увеличении числа мод, распространяющихся с разными и одинаковыми скоростями.

В *Главе 4* изучаются методы компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях связи. Вначале исследуются распределения символьных ошибок при одноканальной передаче 16-QAM сигналов и 16-QAM-OFDM сигналов с различным количеством каналов. Показано, что в первом случае соотношение между символьными ошибками на разных кругах сигнального созвездия зависит от символьной скорости, во втором случае – от числа используемых каналов. Неоднородное распределение ошибок позволяет использовать схему адаптивной модуляции, которая по текущему распределению ошибок изменяет вероятность попадания символов на каждый из кругов зеркального созвездия так, чтобы уменьшить число передаваемых ошибок. В *Главе 4* задача адаптивной модуляции решается с помощью метода множителей Лагранжа. Показано, что разработанная схема адаптивной модуляции значительно улучшает коэффициент битовых ошибок даже при небольшой избыточности сообщения (12%), одновременно увеличивая оптимальную мощность и дальность распространения сигналов. Далее изучается метод компенсации нелинейных искажений, основанный на динамической нейронной сети. Исследования проводились для одноканальной передачи и передачи по 5 каналам с помощью WDM технологии, а также для форматов модуляции 32-QAM и 64-QAM. Для

начала была определена зависимость оптимальной задержки, соответствующей памяти канала, от числа используемых пролетов. Затем динамическая нейронная сеть сравнивалась с другими методами компенсации – линейной схемой компенсации, статической нейронной сетью и методом обратного распространения. Было показано, что предложенная схема динамической нейронной сети заметно улучшает качество передачи сигналов по сравнению с другими методами, а также требует значительно меньшего числа операций на один переданный бит, чем популярный метод обратного распространения сигнала.

В заключении сформулированы основные результаты работ.

Научная новизна работы.

- Автором предложена компактная схема повышенного порядка точности для решения нелинейного уравнения Манакова с первой производной по времени, описывающего распространение сигнала в многомодовых волокнах. Данная схема обладает меньшим временем вычисления с ростом числа мод волокна, чем метод расщепления по физическим процессам, хотя и уступает последнему в точности расчета на фиксированной сетке по временной переменной.
- Показано, что режим слабой связи мод обеспечивает лучшее качество передачи данных в многомодовых линиях связи, чем режим сильной связи мод. Кроме того, для градиентного световода качество передаваемого сигнала увеличивается с ростом числа мод.
- Показано, что схема адаптивной модуляции, применяемая для компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях связи, позволяет существенно повысить качество передачи сигналов при небольшой избыточности сообщения передачи. Это приводит к увеличению расстояния распространения сигнала.
- Впервые предложена схема компенсации нелинейных искажений, основанная на динамических нейронных сетях. Она превосходит остальные методы компенсации по качеству передачи сигнала, а также использует значительно меньше операций на один переданный бит, чем популярный метод обратного распространения сигнала.

Практическая ценность работы. Разработанные методы моделирования распространения оптического сигнала могут быть применимы для проектирования, анализа и оптимизации нового типа волоконно-оптических линий связи – многомодовых линий связи. Предложенная компактная схема повышенного порядка точности позволяет значительно сократить время расчетов при моделировании нелинейного распространения сигналов в многомодовых волокнах в промежуточных режимах связи мод. Исследование параметра качества передачи в различных режимах распространения сигнала важно для оптимизации процесса передачи сигнала, подбора его первоначальных параметров (мощности, типа модуляции, количества каналов) и параметров самого канала, что является актуальной задачей при проектировании новой линии связи. Практическую ценность имеют результаты, относящиеся к методам компенсации нелинейности, так как нелинейные эффекты являются одним из главных факторов, ограничивающих пропускную способность систем передачи данных. Например, метод компенсации нелинейных искажений сигнала на основе динамической нейронной сети заметно улучшает качество передачи данных по сравнению с другими методами компенсации и обладает быстродействием, поэтому является перспективным для восстановления оптического сигнала в приемнике реальных линий связи.

Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе. В ходе работы было опубликовано 12 печатных работ, в которых материалы диссертации изложены достаточно полно, в том числе, 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности. Следует отметить хорошее оформление диссертации. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Имеются следующие замечания по оформлению и содержанию диссертационной работы:

1. На защиту выносится программный комплекс, предназначенный для нахождения пространственного распределения мод волокна и вычисления их констант распространения. Однако в тексте диссертационной работы этот комплекс не приводится и не рассматривается. Поэтому не ясно, как вычислены параметры мод в таблицах 2.3, 3.1, 3.3, 4.1. Такой же вопрос к расчету коэффициента нелинейной связи между пространственными модами. Не ясно, как вычислены данные в таблицах 3.2, 3.4, 4.2.
2. В работе рассматриваются два случая распространения сигналов в многомодовых волокнах – режимы слабой и сильной связи мод. Однако не объяснено, как эти режимы реализуются в реальных волоконно-оптических линиях связи, при каких условиях на практике осуществляется тот или иной тип связи, от чего он зависит (типа модуляции, канала, ...). Кроме того, часто упоминается промежуточный режим связи, но не объясняется его суть. Следовало бы написать, что это за режим, как он связан с режимами сильной и слабой связи мод, при каких условиях осуществляется в реальных линиях связи.
3. В главе 2.2 выводится компактная схема повышенного порядка точности для решения уравнения Манакова, которая обладает большим быстродействием, чем метод расщепления по физическим процессам в промежуточном режиме связи мод. Однако не указано, пытались ли другие исследовательские группы модифицировать метод расщепления или предлагали ли они метод решения уравнения Манакова, который обладал бы своими преимуществами. Ответ на этот вопрос позволит понять место полученных результатов среди мировых достижений.
4. В диссертации не ясно, из каких соображений выбирались те или иные параметры волокна. Почему в параграфах 3.2 и 4.2.1 использовались одинаковые волокна с градиентным профилем показателя преломления, а в параграфах 2.3.3 и 3.1 - разные волокна со ступенчатым профилем показателя преломления?
5. В работе не объяснено существование оптимума начальной мощности при расчете Q-фактора на рисунках 3.2, 3.5-3.9 или коэффициента битовых ошибок на рисунках 4.4, 4.11, 4.20. Почему начальная мощность имеет оптимум?
6. В главе 3 не хватает сравнения параметров передачи данных по волокну со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления. Следовало бы заключить, какой тип волокна перспективнее для проектирования многомодовой линии связи.
7. В работе не объясняется, как проводилась компенсация групповой задержки в приемном устройстве.
8. В диссертационной работе встречаются опечатки в тексте и формулах, необъясненные параметры в формулах, используются разные термины для обозначения одного и того же элемента (например, сердцевина и жила). Однако в целом диссертация написана ясно, хорошо читается и воспринимается.

Заключение. Диссертационная работа Сидельникова О.С. 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 нелинейного распространения света в многомодовых волоконно-оптических линиях связи. Основные результаты проведенных исследований обсуждались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации Сидельникова О.С., а носят рекомендательный характер.

Полученные результаты и выводы диссертации обоснованы, обладают научной новизной и представляют теоретическую и практическую значимость, их достоверность не вызывает сомнений. Эти результаты могут быть использованы для решения задач из области телекоммуникационных технологий, а также прикладных задач по оптимизации передачи данных в волоконных линиях связи. Диссертация Сидельникова О.С. «Математическое моделирование нелинейного распространения оптического сигнала в высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линиях связи» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а сам соискатель Сидельников Олег Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
(ИАиЭ СО РАН)
630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 1
Web-сайт организации: <https://www.iae.nsk.su/>
Телефон: +7 (383) 330-79-69
Адрес электронной почты: iae@iae.nsk.su

Официальный оппонент

Научный сотрудник тематической группы волоконных лазеров лаборатории №17
Института автоматики и электрометрии СО РАН

к.ф.-м.н.

Евменова (Злобина) Екатерина Алексеевна

26 февраля 2018 г.

Подпись Е.А. Евменовой заверяю

Ученый секретарь

Института автоматики и электрометрии СО РАН

к.ф.-м.н.

Донцова Екатерина Игоревна

