



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, д. 1, Москва, ГСП-1, 119991
Тел.: 939-10-00, факс: 939-01-26

04.08.2018 № 286-18/013-031
На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского
Государственного
Университета имени
М.В. Ломоносова
профессор

А.А. Федянин

« _____ » _____ 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 Сидельникова Олега Сергеевича посвящена разработке инструментария для моделирования распространения сигнала и оптимизации высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линий связи, а также разработке методов компенсации нелинейных искажений в системах передачи данных. В диссертации представлены результаты применения разработанного комплекса программ для исследования влияния нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах в режимах сильной и слабой связи мод, изучения особенностей искажения квадратурно-амплитудного оптического сигнала в нелинейном режиме и оптимизации схемы компенсации нелинейных искажений, основанной на динамических нейронных сетях.

Актуальность темы выполненной работы. Актуальность диссертационной работы обусловлена продолжающимся ростом потребностей в величине пропускной способности волоконных линий связи, который вызван стремительным увеличением трафика. Наличие нелинейных ограничений в традиционных дисперсионных линиях связи приводит к существованию «нелинейного» предела скорости передачи

данных, что стимулирует новые исследования в области телекоммуникаций, направленные на преодоление этого ограничения. Привлечение математического моделирования в данных исследованиях позволяет экономить временные и финансовые ресурсы при разработке и оптимизации нового поколения линий связи.

Содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. *Во введении* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы основные цели и задачи работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны важнейшие этапы развития волоконно-оптических линий связи, даны ключевые определения. В разделе 1.1 представлены теоретические основы моделирования волоконно-оптических линий связи. Приведены основные уравнения, описывающие нелинейное распространение оптических сигналов в одно- и многомодовых волокнах. Изложены основные негативные эффекты, приводящие к деградации сигнала в линиях связи. В разделе 1.2 представлена структура волоконно-оптических линий связи. Подробно описываются этапы формирования, распространения по каналу и обработки оптических сигналов в системах передачи данных. Далее автором изложены некоторые особенности исследования многомодовых линий связи, возникающие при решении уравнений распространения оптических волокон в режимах сильной и слабой связи мод.

Во второй главе представлены численные методы, использующиеся для решения уравнений распространения в многомодовых волокнах. В первом разделе подробно описывается наиболее распространенный метод решения уравнений волоконной оптики — метод расщепления по физическим процессам с использованием преобразования Фурье на линейном шаге. Автором показано, что, несмотря на высокую точность по временной переменной и простоту реализации, данный метод имеет существенный недостаток — при решении уравнения распространения сигналов в промежуточных режимах связи метод расщепления требует больших вычислительных затрат. Во втором разделе подробно описан вывод компактной конечно-разностной схемы повышенного порядка для решения уравнений Манакова с первой производной по времени, не обладающей данным недостатком. В разделе 2.3 для описанных численных методов проведены тестовые расчеты и подтвержден порядок точности схем. Кроме того, автором продемонстрировано, что предложенная компактная схема повышенного порядка точности позволяет сократить время расчетов по сравнению с методом расщепления при моделировании нелинейного распространения оптических сигналов в многомодовых волокнах в промежуточных режимах связи мод.

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

первом разделе представлены результаты численного исследования для системы передачи данных, основанной на многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления. Для ступенчатого волокна автором было проведено сравнение режимов сильной и слабой связи мод и показано, что случай слабой связи обеспечивает лучшее качество передачи данных. Кроме того, для ступенчатого волокна показано ухудшение качества передачи данных для сигнала, распространяющегося в моде с малым дисперсионным параметром. Во втором разделе представлены результаты исследования для многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления с «траншеей» в оболочке. Для такого волокна автором показано, что добавление новых мод практически не оказывает влияние на сигналы, распространяющиеся в других модах. Кроме того, продемонстрировано, что в случае, когда сигналы в разных модах движутся с одинаковыми скоростями, увеличение числа мод приводит к ухудшению качества передачи данных.

Четвертая глава посвящена методам компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях связи. В первом разделе автором изучены особенности искажения квадратурно-амплитудного оптического сигнала в нелинейном режиме. На основе полученных данных была реализована схема адаптивной модуляции, которая изменяет вероятность попадания символов на различные круги сигнального созвездия 16-QAM так, чтобы уменьшить коэффициент символьных ошибок. Для данной схемы продемонстрировано повышение качества передачи данных при увеличении избыточности сообщения. Во втором разделе автором предложена схема компенсации нелинейных искажений в приемнике системы связи, основанная на динамических нейронных сетях. Автором проведено сравнение различных методов компенсации нелинейности и показано превосходство предложенной схемы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. Список цитируемой литературы составляет 118 наименований, что свидетельствует о большом объеме работы, выполненной соискателем по изучению материала, относящегося к теме диссертации.

Научная новизна определяется тем, что впервые проведено исследование многомодовых волоконно-оптических линий связи в сочетании с такими современными технологиями, как спектральное уплотнение каналов, применение цифровой обработки сигнала, использование методов машинного обучения. Применение разработанного комплекса программ позволило провести оригинальные исследования и впервые представить следующие результаты:

- Компактную схему повышенного порядка точности для решения уравнения Манакова с первой производной по времени, которая при решении уравнений распространения сигналов в промежуточных режимах связи не требует вычисления матричной экспоненты на каждом шаге.
- Результаты численного сравнения коэффициентов битовых ошибок

при передаче сигнала по многомодовым линиям связи в зависимости от режима связи мод. Результаты демонстрируют, что режим слабой связи мод обеспечивает лучшее качество передачи данных по сравнению с режимом сильной связи.

- Результаты применения схемы адаптивной модуляции при передаче 16-QAM сигналов по волоконно-оптическим линиям связи. Продемонстрировано значительное повышение качества передачи данных при увеличении избыточности сообщения.

- Оригинальную схему обработки сигнала и компенсации нелинейных искажений, основанную на динамических нейронных сетях. Результаты демонстрируют, что применение предложенной схемы позволяет повысить качество передачи данных и увеличить длину распространения при том же уровне ошибок.

Практическая ценность работы. В диссертационной работе Сидельникова О.С. «Математическое моделирование нелинейного распространения оптического сигнала в высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линиях связи» получен ряд новых интересных результатов. Несомненно, важны исследования режимов распространения сигнала в многомодовых волокнах, поскольку пространственное уплотнение является одной из возможных технологий повышения скорости передачи данных в волоконно-оптических линиях связи. В связи с существованием потенциальных применений интересны результаты, относящиеся к методам компенсации нелинейности, так как нелинейные эффекты являются одним из главных факторов, ограничивающих пропускную способность систем передачи данных. Исследования проведены в рамках федерально-целевых программ и гранта президента РФ. Практическая значимость выполненных исследований подтверждается тем, что разработанный комплекс программ позволяет проводить дальнейшее численное моделирование и оптимизацию многомодовых волоконно-оптических линий связи. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы при разработке волоконно-оптических систем связи нового поколения.

Публикации и соответствие автореферата диссертационной работе. Основные результаты работы опубликованы в 12 научных работах, в том числе, 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Имеется свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Замечания по оформлению и содержанию диссертации.

1. Во второй главе сравнивается время расчетов компактной схемы и метода расщепления на одной и той же сетке. Для более адекватного сравнения необходимо для каждого из методов

- рассмотреть сетку, приводящую к одной и той же ошибке.
2. В первом разделе четвертой главы показано повышение качества сигнала при увеличении избыточности сообщения в случае использования схемы адаптивной модуляции. Уместно было бы сделать сравнение с другими методами компенсации нелинейных искажений, которые также уменьшают количество передаваемых ошибок за счет увеличения избыточности.

Заключение.

В целом диссертация Сидельникова О.С. содержит новые научные положения и имеет практическую значимость. Основные результаты проведенных исследований обсуждались на всероссийских и международных конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Отмеченные замечания не являются существенными, носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации Сидельникова О.С. Выводы диссертации достаточно обоснованы, обладают научной новизной и представляют теоретическую и практическую значимость.

Диссертация Сидельникова О.С. «Математическое моделирование нелинейного распространения оптического сигнала в высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линиях связи» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалифицированной работой, которая выполнена на высоком уровне и содержит новые обоснованные научные результаты. Эти результаты могут быть использованы для решения задач из области телекоммуникационных технологий, а также прикладных задач по оптимизации передачи данных в волоконных линиях связи.

Содержание диссертационной работы полностью соответствует паспорту специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а также отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Сидельников Олег Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Отзыв составил
профессор кафедры оптики, спектроскопии
и физики наносистем физического факультета МГУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор
24.01.2018
Email: naniy@t8.ru, тел.: +7 495 939 59 81

О.Е. Наний

Подпись О.Е. Наний заверяю,
начальник отдела кадров

Л.К. Ковалева

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (протокол № 1 от 24 января 2018 г.).

Заместитель заведующего кафедрой оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ

доктор физ.-мат. наук, профессор

24.01.2018

Email: pvkorolenko@rambler.ru, тел. +7 495 939 57 40

П.В. Короленко

Подпись П.В. Короленко заверяю,
начальник отдела кадров

Л.К. Ковалева

Ученый секретарь кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ

кандидат физ.-мат. наук, доцент

24.01.2018

Email: vokhnik@rambler.ru, тел. +7 495 939 36 59

О.М. Вохник

Подпись О.М. Вохник заверяю,
начальник отдела кадров

Л.К. Ковалева