

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

### Актуальность

Для передачи больших объёмов данных на большие расстояния с высокой скоростью используются волоконно-оптические линии связи. При использовании стандартного одномодового волокна для модуляции и уплотнения сигналов задействуются все имеющиеся степени свободы — время, частота, фаза и поляризация. Максимальная скорость передачи сигналов по трем пролетам длиной 55 км для стандартного одномодового волокна составила 101.7 Тб/с. Однако дальнейшее увеличение пропускной способности таких систем затруднено ввиду различных ограничений.

Дисбаланс между ростом общемирового информационного трафика (порядка 40% в год) и ростом совокупной пропускной способности современных волоконно-оптических линий связи (20% в год) приведет к риску замедления динамики информационного обмена. Использование многомодовых волокон рассматривается в настоящее время в качестве перспективного технологического пути для дальнейшего увеличения пропускной способности за счет одновременной передачи данных по разным модам волокна.

Большинство результатов по использованию многомодовых волокон 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 работах, посвящённых использованию многомодовых волокон в реальных линиях связи, либо рассматривается распространение на слишком короткие дистанции, либо используются неполные модели, учитывающие лишь малое число эффектов. Поэтому исследования, посвящённые использованию многомодовых волокон в линиях связи для увеличения их пропускной способности, являются актуальными.

### Содержание работы и ее завершенность.

Диссертация посвящена изучению влияния нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых линиях связи в режимах сильной и слабой связи мод. В соответствии с поставленной целью исследования и вытекающими из нее основными задачами, материалы диссертации сгруппированы в четыре главы, первая из которых является обзорной.

Вторая глава диссертации посвящена описанию основных численных методов решения уравнений распространения оптических сигналов в многомодовых волокнах —

метода расщепления по физическим процессам с использованием преобразования Фурье на линейном шаге и компактной конечно-разностной схемы повышенного порядка аппроксимации для решения уравнений Манакова с первой производной по времени. Также представлены результаты численных расчётов для рассмотренных методов. Проведенное сравнение времени расчетов исследуемых схем при решении уравнений распространения оптических сигналов в промежуточных режимах связи в зависимости от числа мод показало, что уже при четырёх модах компактная схема опережает метод расщепления по времени вычисления, и с ростом числа мод это превосходство растет.

В третьей главе рассмотрено влияние нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах. Представлены результаты численного моделирования для многомодового волокна со ступенчатым профилем показателя преломления. Для данного волокна проведено сравнение режимов сильной и слабой связи при передаче данных по всем модам волокна и исследование влияния нелинейных эффектов при увеличении числа мод в этих режимах. Также представлены результаты исследования влияния нелинейных эффектов на распространение сигналов в многомодовых волокнах с градиентным профилем показателя преломления с “траншеей” в оболочке в режиме слабой связи мод. Приведены основные параметры волокна, поддерживающего распространение 9 мод. Для такого волокна проведено исследование влияния нелинейных эффектов на сигнал, распространяющийся в фундаментальной моде LP<sub>01</sub> при увеличении числа задействованных мод.

Четвертая глава диссертации посвящена анализу методов компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях связи. Исследованы особенности искажения квадратурно-амплитудного оптического сигнала в нелинейном режиме. Проведен анализ влияния нелинейности на статистику символьных ошибок при передаче 16-QAM сигналов по оптическим линиям связи. На основе полученных данных была реализована схема адаптивной модуляции, 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 степени снижения символьных ошибок от избыточности кода и показано, что количество ошибок может быть уменьшено вдвое при избыточности 12%. 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)

Завершенность работы подтверждается, например, тем, что 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.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, получены на основе апробированных методов численного моделирования. Защищаемые положения вытекают из представленных в диссертации и опубликованных в рецензируемых изданиях результатов исследования, позволяющих оценить влияние различных факторов на пропускную способность многомодовых волокон.

### **Достоверность и апробация результатов**

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.

Основные результаты работы достаточно широко опубликованы в научной печати, изложены в 5 статьях в рецензируемых периодических журналах из списка ВАК, 6 публикациях международных и российских конференций, 1 зарегистрированной в Роспатенте программе для ЭВМ

### **Научная новизна работы**

К наиболее значимым результатам следует отнести следующее:

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.

### **Практическая и теоретическая значимость работы**

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 оптимизации 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 РФФИ 14-21-00110 “Моделирование сложных нелинейных лазерных и телекоммуникационных систем” (2014–2016 гг.), Гранта Министерства образования и науки РФ 14.B25.31.0003 “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.).

### **Замечания к работе**

1. В названии диссертации частично повторяется название специальности. Представляется более подходящим, например, следующее: «Влияние нелинейных эффектов при распространении оптического сигнала в высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линиях связи».

2. В диссертации отсутствует сравнение между волокнами со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления с тем, чтобы использовать результаты для практических целей.

3. В Главе 2 выводится компактная конечно-разностная схема для уравнений Манакова и проводится анализ ее свойств, однако для получения корректных результатов необходимо, чтобы рассматриваемое уравнение было представлено в безразмерном виде. В тексте же нигде об этом не упоминается.

4. Можно отметить ряд несущественных замечаний, таких, как наличие орфографических, грамматических и стилистических ошибок.

Однако указанные недостатки не снижают общей высокой оценки уровня работы и значения представленных в диссертации результатов.

### **Заключение**

Диссертация О.С. Сидельникова «Математическое моделирование нелинейного распространения оптического сигнала в высокоскоростных одно- и многомодовых оптоволоконных линиях связи» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изучено влияние 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. Приятное впечатление от диссертации вызывает тот факт, что подробно изложена физическая составляющая представленных исследований, что существенно облегчает реализацию экспериментов по передаче данных по многомодовым волокнам.

Диссертация О.С. Сидельникова удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, удовлетворяет критериям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Сидельников Олег Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой

степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 –  
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Профессор кафедры Лазерных систем,

доктор физико-математических наук по

специальности 01.04.21 – лазерная физика,

профессор

27.02.2018 г.

Дмитриев  
Александр Капитонович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Новосибирский государственный технический университет»,

630073, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20

Тел +7 913 937 7139

e-mail: dmitriev@corp.nstu.ru

подпись *Дмитриев А К*

Начальник отдела кадров

*Ш* О. К. Пустовалова

