

На правах рукописи



Бурдин Антон Владимирович

**МАЛОМОДОВЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ
ПЕРЕДАЧИ КОМПАКТНЫХ МНОГОПОРТОВЫХ
ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ**

Специальность 05.12.13 –
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Уфа – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», на кафедре линий связи и измерений в технике связи.

Научный консультант:

д-р техн. наук, профессор

Владимир Александрович Андреев

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», ректор

Официальные оппоненты:

д-р техн. наук, старший научный сотрудник

Цым Александр Юрьевич

ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт связи», начальник лаборатории

д-р техн. наук, профессор

Морозов Олег Геннадьевич

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем

д-р техн. наук,

Багманов Валерий Хусаинович

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», профессор кафедры телекоммуникаций

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Защита состоится 20 декабря 2013 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.07 при ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д212.288.07

д-р техн. наук, профессор



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день применение оптических волокон (ОВ) уже давно перестало ассоциироваться исключительно с магистральными волоконно-оптическими линиями передачи (ВОЛП) сверхбольшой протяженности или оптическими кольцами городских сетей связи. Увеличение спроса на услуги широкополосного доступа, конвергенция информационных и телекоммуникационных технологий, появление новых мультимедийных приложений на рынке инфокоммуникаций, расширение и интеграция корпоративных информационно-вычислительных сетей, наконец, повсеместное внедрение облачных технологий, которые нередко сегодня называют современной «золотой жилой» индустрии инфокоммуникаций, – вот лишь малая часть большого перечня факторов, определяющих активное развитие сегментов инфокоммуникационных сетей, отличающихся компактностью и высокой плотностью размещения большого числа портов при одновременно малой (от нескольких десятков/сотен метров до 2 км) протяженности волоконно-оптических соединительных линий. С учетом вышесказанного, сети такого типа целесообразно выделить в отдельную группу инфокоммуникационных компактных многопортовых сетей (КМС).

Современные КМС реализуется на базе кварцевых многомодовых ОВ в сочетании с технологией FTTx (Fiber To The «x» – «волоконно до «x»») – в частности, FTTE («enclosure» – «волоконно до конструктива») или FTTD («desk» – «волоконно до рабочего места»). Здесь можно перечислить такие приложения, как структурированные кабельные системы (СКС), СКС центров обработки данных и вычислительных центров, сети хранения данных, локальные информационно-вычислительные сети, внутрикорпоративные и технологические сети передачи данных, сети систем промышленной автоматизации, бортовые сети, беспроводные сети доступа на уровне микро- и пикосот на основе технологии FTTA («antenna» – «волоконно до антенны») и многие другие.

При этом активное оборудование мультигигабитных сетей передачи данных использует в оптических модулях когерентные источники излучения – одномодовые лазерные диоды (ЛД) или менее дорогостоящие, по сравнению с первыми, лазеры поверхностного излучения с вертикальным объемным резонатором (VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser). В многомодовых ОВ при возбуждении когерентными источниками имеет место маломодовый режим распространения оптического излучения: сигнал переносится по ОВ ограниченным набором модовых составляющих, число которых, в зависимости от категории ОВ и исходного модового состава излучения лазера, в общем случае, как показывают результаты экспериментальных и теоретических исследований, не превышает 50.

В среднем, каждые 4 – 5 лет происходит ратификация нового сетевого стандарта, проводится полное обновление состава активного оборудования

волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) КМС. В то время как срок службы кабельных линий связи составляет, как минимум, 25 лет, а, с учетом «тепличных» условий эксплуатации, для внутриобъектовых соединительных линий КМС – еще больше. При этом каждый последующий стандарт ориентирован на кварцевые многомодовые ОВ новой категории и уменьшает допустимую протяженность ВОЛП с волокнами предыдущего поколения практически на порядок. Таким образом, возникают задачи как адаптации линейного тракта находящихся в эксплуатации многомодовых ВОЛП для передачи сигналов высокоскоростных мультигигабитных ВОСП в маломодовом режиме, так и разработки новых многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания в маломодовом режиме передачи сигнала.

Степень разработанности темы исследования. Термин «маломодовый» в приложении к оптическим волноводам волоконно-оптической техники связи впервые введен в монографии И.И. Теумина, опубликованной в 1978 г. В работах зарубежных авторов указанного периода времени этот термин практически не встречается. Исключением в данном случае является известная монография А. Снайдера и Дж. Лава, датированная 1983 г. Напротив, термин «маломодовый режим передачи оптического сигнала» достаточно активно использовался в работах советских авторов в контексте телекоммуникационных «маломодовых ОВ» и «маломодовых оптических систем связи» вплоть до конца 80-х гг. Это публикации Г.И. Гроднева, Е.М. Дианова, А.М. Прохорова, Л.М. Андрушко.

В маломодовом режиме на передний план выходит необходимость «индивидуальной» оценки параметров передачи направляемых мод заданного порядка, участвующих в переносе мощности оптического сигнала по многомодовому ОВ заданной конструкции. Модовый состав излучения лазера и условия ввода определяют исходный набор модовых компонентов и значения их амплитуд непосредственно на передающей стороне многомодовой ВОЛП. К основным факторам искажения относятся дифференциальная модовая задержка (DMD – Differential Mode Delay) и хроматическая дисперсия основной моды и мод высших порядков. При распространении маломодовых сигналов в сильно нерегулярных волокнах взаимодействие и смешение мод может оказывать существенное влияние на проявление DMD за счет возникновения новых или, напротив, снижения мощности исходных модовых составляющих сигнала.

На сегодняшний день разработаны и утверждены четыре стандарта IEEE, спецификации которых регламентируют совместное применение лазерных источников излучения и кварцевых многомодовых ОВ в маломодовом режиме: 802.3z, 802.3ae, 802.3aq и 802.3ba. Данные стандарты накладывают жесткие ограничения на протяженность маломодовых ВОЛП КМС, в том числе и с многомодовыми ОВ последнего поколения.

Известно достаточно много методов, средств и способов по увеличению пропускной способности многомодовых ВОЛП, в том числе и в маломо-

довом режиме, разработанных на базе моделей как многомодовой линии в целом, так и отдельных ее компонентов. Данному направлению посвящено большое количество работ, среди которых следует выделить группу авторов, принимавших непосредственное участие в разработке указанных стандартов IEEE. Это, в частности, Л. Аронсон, Л. Бакмен, С. Боттаччи, Б. Витлок, С. Голлович, Ч. Ди Минико, Д. Каннингем, П. Колесар, Д. Молин, Дж. Морикуни, М. Новелл, П. Пепелджугоски, Л. Раддац, А. Ристетский, Дж. Ритгер, Г. Шаулов, И. Уайт, Дж. Эббот и многие др.

Однако подавляющее большинство известных моделей распространения маломодовых оптических сигналов по многомодовым ВОЛП, в том числе и разработанных перечисленными выше авторами, ориентированы в основном на теоретическое исследование эффекта DMD как ключевого фактора искажения сигналов в маломодовом режиме передачи. В частности, проявление DMD в зависимости от условий ввода излучения с выхода лазера в сердцевину ОВ, а также отклонения градиентного профиля реальных волокон от оптимальной формы. Отдельное внимание уделяется имитационному моделированию процессов формирования, преобразования и обработки сигналов в передающих и приемных оптических модулях активного оборудования ВОСП. В некоторых работах вводится обобщенный параметр хроматической дисперсии ОВ на весь модовый состав сигнала. При этом, в целом вопрос учета «индивидуального» проявления хроматической дисперсии для каждой отдельной модовой составляющей сигнала остается открытым.

Кроме того, большинство указанных работ пренебрегает процессами взаимодействия и смешения мод, обусловленными нерегулярной структурой ОВ, а также наличием микро- и макро-изгибов волокон инсталлированной ВОЛП, что обосновывается малой, существенно ограниченной ратифицированными стандартами, протяженностью линейного тракта многомодовой ВОЛП мультигигабитной сети. В отдельных случаях вводятся поправочные коэффициенты и «штрафы» по так называемому модовому шуму. Однако и здесь акцент делается в основном на перераспределении мощности между модовыми группами при прохождении оптического сигнала через соединения волокон/патчкордов в распределительных боксах, точках консолидации или конечных кроссовых устройствах коммутации.

Таким образом, для разработки и последующей апробации эффективных подходов увеличения пропускной способности маломодовых ВОЛП КМС возникает потребность в построении нового быстродействующего метода моделирования линейного тракта многомодовой ВОЛП, функционирующей в маломодовом режиме передачи сигнала, который позволил бы в комплексе учесть такие факторы, как: условия ввода и тип лазерного источника излучения, DMD, хроматическую дисперсию, в том числе и на модах высших порядков, процессы взаимодействия и смешения модовых компонентов сигнала, обусловленные нерегулярной структурой реальных ОВ, а также

наличием микро- и макро-изгибов ОВ, неизбежно возникающих при установке реальных кабельных линий.

Целью диссертационной работы является разработка научно-технических основ обеспечения эффективного функционирования ВОЛП инфокоммуникационных КМС в маломодовом режиме.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решаются следующие **основные задачи**:

1. Разработка приближенного метода анализа слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, позволяющего проводить расчет спектральных характеристик параметров передачи направляемых мод произвольного порядка.

2. Разработка математической модели стыка неодинаковых слабонаправляющих ОВ, позволяющей учитывать введенное осевое или угловое расогласование.

3. Разработка математической модели возбуждения слабонаправляющих ОВ когерентными источниками оптического излучения, позволяющей учитывать исходный модовый состав сигнала на выходе источника и заданных условий ввода сигнала.

4. Разработка математической модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП с нерегулярными кварцевыми слабонаправляющими многомодовыми ОВ, позволяющей совместно учитывать исходный модовый состав излучения на выходе когерентного источника, условия ввода сигнала, проявление DMD, хроматической дисперсии, а также взаимодействие и смешение модовых компонентов сигнала.

5. Разработка методов увеличения пропускной способности многомодовых ВОЛП с учетом особенностей маломодового режима передачи оптических сигналов.

Научная новизна работы:

1. Разработан приближенный метод анализа слабонаправляющих волоконных световодов, использующий сочетание приближения Гаусса и метода стратификации, на основании которого впервые получены аналитические выражения производных постоянной распространения, позволяющие провести расчет спектральных характеристик дисперсионных параметров направляемых мод произвольного порядка кварцевых слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, в том числе сложной формы с локальными технологическими дефектами и флуктуациями показателя преломления.

2. Разработана универсальная методика анализа соединения неодинаковых ОВ, основанная на совместном применении предложенного приближенного метода и метода интеграла перекрытия полей. Впервые получены аналитические формулы, позволяющие провести расчет коэффициентов связи направляемых мод произвольного порядка на соосном стыке, либо стыке с расогласованием кварцевых слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметрич-

ным профилем показателя преломления, с учетом влияния введенного осевого смещения или углового рассогласования торцов соединяемых ОВ.

3. Разработаны математические модели возбуждения кварцевых слабо-направляющих многомодовых ОВ когерентными источниками оптического излучения (одномодовым ЛД, маломодовым VCSEL), отличающиеся учетом исходного модового состава сигнала на выходе источника и заданных условий ввода сигнала, в том числе параметров согласующего световода и введенного осевого смещения или углового рассогласования и позволяющие провести расчет начального распределения амплитуд возбуждаемых в многомодовом ОВ линии мод, с учетом перечисленных условий ввода, а также особенностей профиля показателя преломления и конструкции ОВ линейного тракта ВОЛП.

4. Предложена математическая модель маломодовой ВОЛП КМС, основанная на кусочно-регулярном представлении с применением общего подхода метода расщепления по физическим процессам, которая, в отличие от известных решений, совместно учитывает исходный модовый состав оптического излучения на выходе когерентного источника, вводимого в ОВ линии, условия ввода сигнала, проявление DMD, хроматической дисперсии, в том числе на модах высших порядков, вариации геометрических параметров ОВ вдоль длины ВОЛП, а также наличие изгибов ОВ, что позволяет провести расчет формы импульсного отклика маломодового оптического сигнала на выходе кварцевого слабонаправляющего нерегулярного многомодового ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления с учетом вышеперечисленных факторов.

5. Предложен универсальный подход к построению устройств для увеличения пропускной способности многомодовых ВОЛП в маломодовом режиме передачи оптических сигналов, который, в отличие от известных решений, базируется на выборе параметров элементов конструкции устройства таким образом, чтобы обеспечивалось воспроизведение заданной базовой диаграммы групповых скоростей отдельных направляемых мод, число и порядок которых непосредственно определяются исходным модовым составом излучения на выходе источника и условиями ввода.

6. Разработана методика синтеза градиентных профилей показателя преломления кварцевых слабонаправляющих многомодовых ОВ с реверсивной DMD (RDMDF – Reverse DMD Fibers) для компенсации последней в маломодовых ВОЛП КМС. Данная методика, в отличие от известных решений, базируется на выборе специализированной формы профиля показателя преломления, которая обеспечивает воспроизведение инвертированной относительно базовой основного многомодового ОВ линии диаграммы групповых скоростей направляемых мод, число и порядок которых непосредственно определяются исходным модовым составом излучения на выходе источника, условиями ввода сигнала, а также технологическими параметрами основного многомодового ОВ линии. Это позволяет в результате каскадного включения

основного многомодового ОВ и волокна RDMDF компенсировать DMD в маломодовых ВОЛП КМС с учетом вышеперечисленных факторов.

7. Разработана методика синтеза градиентных профилей показателя преломления кварцевых слабонаправляющих многомодовых ОВ с уменьшенной DMD (LDMDF – Low DMD Fibers). Данная методика, в отличие от известных решений, базируется на выборе специализированной формы профиля показателя преломления, которая обеспечивает построение плоской диаграммы групповых скоростей направляемых мод, число и порядок которых непосредственно определяются исходным модовым составом излучения на выходе источника и условиями ввода сигнала. Это позволяет обеспечить выравнивание групповых скоростей модовых составляющих маломодового сигнала и тем самым уменьшить проявление DMD в маломодовых ВОЛП КМС с учетом вышеперечисленных факторов.

Практическая значимость:

1. Разработаны практические рекомендации по подключению кварцевых многомодовых ОВ категории OM2 и OM2+/OM3 к одномодовым ЛД, которые позволяют реализовать центрированный ввод, либо равномерное возбуждение модового состава ОВ ROFL (Radially Overfilled Launch) с использованием в качестве согласующего световода стандартного одномодового ОВ рек. ITU-T G.652, и центрированный ввод с выравниванием диаметра пятна основной моды MFMCL (Mode-Field Match Central Launch), либо ввод ROFL с использованием в качестве согласующего световода одномодовых ОВ с увеличенным диаметром пятна моды LMA (Large Mode Area) при подключении к когерентному источнику оптического излучения (ЛД, VCSEL), учитывающие технологические дефекты профиля показателя преломления многомодовых ОВ.

2. Разработана методика построения эквивалентного градиентного профиля показателя преломления кварцевых многомодовых ОВ категории OM2 по диаграмме групповых скоростей модового состава, восстановленной по результатам анализа формы импульсного отклика маломодового оптического сигнала на выходе исследуемого многомодового ОВ, позволяющая далее перейти к оценке пропускной способности многомодовых ОВ, в том числе установленных ВОЛП, функционирующих в маломодовом режиме.

3. Предложен способ компенсации DMD многомодовой ВОЛП в маломодовом режиме, базирующийся на последовательном включении основного многомодового ОВ линии и компенсирующего многомодового ОВ RDMDF. Разработана методика расчета, получены профили показателя преломления волокон RDMDF, разработаны практические рекомендации по выбору профиля показателя преломления и длины компенсирующего многомодового ОВ RDMDF, в зависимости от технологических параметров основного многомодового ОВ линии, типа когерентного источника излучения и условий ввода оптического сигнала, что позволяет в результате компенсировать DMD в маломодовых ВОЛП КМС с учетом вышеперечисленных факторов.

4. Предложен способ уменьшения DMD в кварцевых многомодовых ОВ традиционной конструкции – ОВ LDMDF, основанный на выборе специализированной формы профиля показателя преломления, которая обеспечивает выравнивание групповых скоростей направляемых мод заданного порядка. Разработана методика расчета, получены профили показателя преломления волокон LDMDF, разработаны практические рекомендации по выбору профиля показателя преломления многомодовых ОВ LDMDF, в зависимости от типа когерентного источника излучения и условий ввода оптического сигнала в ОВ линии.

5. Разработаны практические рекомендации по отбору многомодовых ОВ строительных длин оптического кабеля, реконструкции и увеличению пропускной способности находящихся в эксплуатации и реализации новых многомодовых ВОЛП для совместной работы с ВОСП мультигигабитных инфокоммуникационных КМС, измерения параметров многомодовых ВОЛП в маломодовом режиме, а также предложены способы идентификации многомодовых ОВ с повышенной DMD, компенсации DMD и увеличения пропускной способности многомодовой ВОЛП в режиме передачи маломодовых сигналов, применение которых позволяет повысить эффективность функционирования ВОЛП инфокоммуникационных КМС в маломодовом режиме.

Практическая значимость результатов работы подтверждается их внедрением на предприятиях ОАО «Волжская территориальная генерирующая компания» (ОАО «ВоТГК»), ОАО «Связьстрой-4», ООО НПП «СвязьАвтоматикаМонтаж» (ООО НПП «САМ»), ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания» (ЗАО «СОКК»). Элементы теории, методики и практические рекомендации внедрены в учебный процесс ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики». Внедрение результатов подтверждено 5 соответствующими актами.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы: теории оптических волноводов, теории линий передачи, теории связи мод диэлектрических волноводов, дифференциального и интегрального исчисления, интегральных уравнений, вариационного исчисления, численного моделирования, а также математический аппарат преобразования Фурье.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Приближенный метод анализа кварцевых слаборазделяющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, позволяющий проводить расчет спектральных характеристик дисперсионных параметров передачи направляемых мод произвольного порядка.

2. Методика расчета коэффициентов связи направляемых мод произвольного порядка на стыке кварцевых слаборазделяющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, позволяющая учитывать введенное осевое смещение или угловое рассогласование торцов соединяемых ОВ.

3. Математические модели возбуждения кварцевых слабонаправляющих многомодовых ОВ когерентными источниками оптического излучения (одномодовым ЛД, маломодовым VCSEL), позволяющие учитывать исходный модовый состав на выходе источника и условия ввода сигнала.

4. Математическая модель маломодовой ВОЛП КМС, основанная на кусочно-регулярном представлении с применением общего подхода метода расщепления по физическим процессам, позволяющая совместно учитывать исходный модовый состав оптического излучения на выходе когерентного источника, вводимого в ОВ линии, условия ввода сигнала, проявление DMD, хроматической дисперсии, в том числе на модах высших порядков, вариации геометрических параметров ОВ вдоль длины ВОЛП, а также наличие изгибов ОВ.

5. Способ компенсации DMD многомодовой ВОЛП, который заключается в последовательном включении основного многомодового ОВ линии и компенсирующего многомодового ОВ RD MDF, отличающегося специализированной формой градиентного профиля показателя преломления, позволяющей обеспечить воспроизведение реверсивной диаграммы групповых скоростей направляемых мод заданного порядка относительно базовой диаграммы основного ОВ линии (патент RU 2468399).

6. Способ уменьшения DMD многомодовых ВОЛП, заключающийся в применении многомодовых ОВ LD MDF с градиентным профилем показателя преломления специализированной формы, позволяющей обеспечить выравнивание групповых скоростей направляемых мод заданного порядка (патент RU 2458370).

7. Методика построения эквивалентного градиентного профиля показателя преломления кварцевых многомодовых ОВ категории OM2 по диаграмме групповых скоростей модового состава, восстановленной по результатам анализа формы импульсного отклика маломодового оптического сигнала на выходе исследуемого многомодового ОВ.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность результатов подтверждается адекватностью использования методов теории оптических волноводов и теории линий передачи; предельными переходами отдельных полученных результатов в известные соотношения для оптических волноводов; сравнением с расчетными данными, полученными с использованием строгих математических методов анализа диэлектрических волноведущих структур; сопоставлением с расчетными данными, приведенными в опубликованных ранее научных публикациях отечественных и зарубежных авторов; экспериментальной апробацией с применением сертифицированного измерительного оборудования.

Личный вклад. Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной, получены автором самостоятельно и соответствуют пунктам 11 – 14 паспорта специальности 05.12.13.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научных сессиях

НТО РЭС, посвященных Дню радио (Москва, 2003 – 2009, 2011); IV – XIII международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Уфа, 2003 – 2005; Самара, 2006; Уфа, 2007; Казань, 2008; Самара, 2009; Уфа, 2010; Казань, 2011; Уфа, 2012); II Всероссийской конференции «Современные технологии проектирования, строительства и эксплуатации линейно-кабельных сооружений» (Санкт-Петербург, 2003); Международной научно-технической конференции «IT Com» (США, Орландо, 2003); Научно-технической конференции «Волоконно-оптические системы и сети связи» (Москва, 2004); III – XI Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Волгоград, 2004; Самара, 2006; Казань, 2007; Самара, 2008; Санкт-Петербург, 2009; Миасс, 2010; Самара, 2011; Екатеринбург, 2012); V Международной научно-технической конференции «5th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication» (Япония, Нара, 2006); I – III Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь, 2007, 2009, 2011); III – V Российских семинарах по волоконным лазерам (Саратов, 2008, Уфа, 2009; Ульяновск, 2010; Новосибирск, 2011); XVI, XVIII Международном семинаре «International Workshop on Optical Waveguide Theory and Numerical Modeling» (Дания, Копенгаген, 2007; Германия, Йена, 2009); V Отраслевой научной конференции «Технологии информационного общества» (Москва, 2011); Международной научно-технической конференции «Photonics West» (США, Сан-Франциско, 2012), а также IV Международной заочной научно-практической конференции «Проблемы развития и применения информационных технологий на предприятиях» (Вязьма, 2013) и XI – XX Российской научно-технической конференции проф.-преп. состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (Самара, 2004 – 2013).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в 67 печатных трудах, включая 20 публикаций в журналах, входящих в перечень ВАК, 7 патентов, 2 монографии, а также 38 статей в научных изданиях. Некоторые результаты работы отражены также в отчетах по хозяйственным НИР, в которых автор принимал участие в качестве исполнителя.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 160 рисунков и 10 таблиц. Основное содержание работы представлено на 347 страницах машинописного текста. Список литературы включает 1227 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основании проведенного анализа состояния вопроса инсталляции многомодовых ВОЛП на инфокоммуникационных КМС зарубежных и отечественных предприятий выявлены особенности российского

рынка потребления многомодовых ОВ. Перечислены преимущества применения многомодовых ОВ для линий передачи КМС, с учетом которых сформулированы перспективы развития многомодовых сегментов отечественных инфокоммуникационных сетей.

Сформулировано понятие «маломодовый режим» передачи оптических сигналов в приложении к многомодовыми ВОЛП инфокоммуникационных КМС.

Рассмотрены особенности распространения оптических сигналов в маломодовом режиме по традиционным кварцевым многомодовым ОВ, выявлены ключевые факторы их искажения.

Представлен обзор известных на сегодняшний день методов и средств увеличения пропускной способности многомодовых ВОЛП, функционирующих в маломодовом режиме, которые позволяют реализовать высокоскоростную передачу сигналов на мультигигабитных скоростях по многомодовым ОВ увеличенной протяженности. На основании проведенного обзора известных решений, с учетом особенностей российского рынка КМС, выявлены наиболее востребованные и актуальные, с точки зрения отечественных предприятий, технологии. Это, в частности, способы и устройства согласования многомодовых ОВ и лазерных источников, многомодовые ОВ для компенсации DMD, а также многомодовые ОВ с увеличенной полосой пропускания в маломодовом режиме. Однако, как показали результаты проведенного сравнительного анализа, перечисленные решения требуют дальнейшего развития.

Вторая глава посвящена разработке метода анализа кварцевых слабо-направляющих многомодовых ОВ. Предварительно на основе поставленных основных целей и задач, решаемых в диссертационной работе, а также выявленных и перечисленных выше особенностей маломодового режима, сформулированы ключевые требования, которым должен удовлетворять искомый метод. Это, в частности, следующие критерии: 1) универсальность (возможность расчета волоконных световодов со сложной формой осесимметричного профиля показателя преломления, соответствующего реальным промышленным образцам кварцевых градиентных многомодовых ОВ); 2) быстродействие при удовлетворительной погрешности вычислений; 3) минимальные затраты на поиск и устранение нефизических решений; 4) возможность расчета дисперсионных параметров направляемых мод произвольного порядка; 5) возможность однозначной, желательно «автоматизированной», идентификации порядка моды и последующее сопоставление ей вычисленного значения постоянной распространения.

Проведен обзор методов расчета оптических волноводов, с точки зрения возможности их применения к поставленной задаче. Анализ известных строгих, численно-аналитических и приближенных методов показал, что возможности их применения для решения поставленной задачи достаточно ограничены и требуют соответствующей доработки и адаптации.

Для решения поставленной задачи разработана модификация приближения Гаусса (ОМПГ), обобщенная на случай расчета спектральных характеристик дисперсионных параметров направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления. Предложенный метод базируется на сочетании приближения Гаусса, модифицированного для расчета многомодовых ОВ, и методе стратификации. Здесь, в отличие от известных решений, предлагается рассматривать исследуемый слабонаправляющий волоконный световод с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, ограниченным одной внешней сплошной оболочкой, как слабонаправляющий волоконный световод с многослойным профилем показателя преломления. При этом профиль в области сердцевины ОВ представляется в виде конечного числа N слоев, в пределах которых значение показателя преломления остается постоянным. В результате при задании исходных данных расчета обеспечивается детализированное воспроизведение профиля показателя преломления исследуемого ОВ, что существенно снижает погрешность расчетов.

Таким образом, в отличие от ряда известных модификаций приближения Гаусса, базирующихся на представлении профиля одной или набором простых гладких функций, вынужденных по этой причине для уменьшения ошибки вычислений использовать несколько вариационных параметров и, соответственно, вводить набор аппроксимирующих выражений для описания радиального распределения поля моды на разных интервалах сечения сердцевины ОВ, в данном ОМПГ, так же, как и в классическом методе, подробно изложенном в монографии А. Снайдера, Дж. Лава, предлагается ограничиться одним вариационным параметром – нормированным эквивалентным радиусом пятна моды R_0 , который в рамках данного приближения является базовым и полностью определяет искомые характеристики моды. Здесь для представления радиального распределения поля моды заданного порядка исследуемого ОВ используется известное аппроксимирующее выражение, соответствующее точному решению скалярного волнового уравнения для слабонаправляющих ОВ с идеальным неограниченным параболическим профилем показателя преломления, записанное в базисе функций Лагерра-Гаусса.

Следует отметить, что, в рамках приближения Гаусса, при переходе к высшим модам произвольного порядка возникают определенные трудности интегрирования известного вариационного выражения, записанного для квадрата параметра моды в сердцевине U^2 слабонаправляющих ОВ. Последние связаны с интегралами от квадрата полинома Лагерра и произведения полиномов Лагерра одного порядка разной степени, которые, в общем случае, не относятся к табличным. В данной работе эта проблема преодолевается путем использования формулы явного представления полинома Лагерра в виде конечного степенного ряда соответствующего вида.

Все это позволяет перейти к аналитической форме записи вариационного выражения для квадрата волноводного параметра моды в сердцевине U^2 в виде конечных вложенных сумм:

$$U^2 = \frac{(m-1)!}{(l+m-1)!} \left\{ \frac{M}{R_0^2} + V^2 \left[X_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (X_1 - X_2) \right] \right\}; \quad (1)$$

$$X_j = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} & j = 0; \\ \exp\left(-\frac{(k+j-1)^2}{N^2 R_0^2}\right) \sum_{q=0}^{2m-2} D_q \sum_{p=0}^{l+q} \frac{(l+q)!}{p! R_0^{2p}} \frac{(k+j-1)^{2p}}{N^{2p}} & j = 1, 2; \end{cases}$$

где l – азимутальный порядок моды; m – радиальный порядок моды; $R_0 = \rho_0/a$ – эквивалентный нормированный радиус пятна моды; ρ_0 – эквивалентный радиус пятна моды; a – радиус сердцевины; N – число слоев представления профиля исследуемого ОВ;

$$M = \frac{(l+m-1)!(3l+2m-1)}{(m-1)!} + 2l^2 \sum_{q=0}^{2m-2} D_q (q+l-1)! - 4l \sum_{q=0}^{2m-2} C_q (q+l)!;$$

$$D_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l, m-1)}; \quad C_q = \sum_{p=\max(0, q-m+1)}^{\min(q, m-1)} b_p^{(l, m-1)} b_{q-p}^{(l+1, m-1)};$$

$b_p^{(l, m)}$ – соответствующие коэффициенты степенного ряда формулы явного выражения полинома Лагерра $L_m^{(l)}(x)$; $V = k_0 a n_{\max} \sqrt{2\Delta}$ – нормированная частота (волноводный параметр), определяемая первичными параметрами ОВ; $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число для оптической волны в вакууме; λ – рабочая длина волны; $\Delta = (n_{\max}^2 - n_N^2)/(2n_{\max}^2)$ – параметр высоты профиля показателя преломления; n_{\max} – максимальное значение показателя преломления сердцевины; n_N – показатель преломления внешней сплошной оболочки; $h_k = (n_{\max}^2 - n_k^2)/(n_{\max}^2 - n_N^2)$ – локальный параметр профиля; а n_k – показатель преломления k -го промежуточного слоя ($k=0, 1, 2 \dots N-1$).

Характеристическое уравнение для эквивалентного нормированного радиуса пятна моды $\partial U^2 / \partial R_0$, получаемое, согласно общему алгоритму приближения Гаусса в результате дифференцирования (1) по R_0 , также приводится к аналитическому виду:

$$-M + V^2 \left[S_0 + \sum_{k=0}^{N-1} h_k (S_1 - S_2) \right] = 0; \quad (2)$$

$$S_j = \begin{cases} X_0 \left(1 - pR_0^2 \right) & j = 0; \\ X_j \left(\frac{(k + j - 1)^2}{N^2} - pR_0^2 \right) & j = 1, 2. \end{cases}$$

Это позволило получить аналитические формулы для производных $\partial U^2 / \partial \lambda$; $\partial^2 U^2 / \partial \lambda^2$; $\partial R_0 / \partial \lambda$; $\partial^2 R_0 / \partial \lambda^2$, затем, соответственно, перейти к производным постоянной распространения $\partial \beta / \partial \lambda$ и $\partial^2 \beta / \partial \lambda^2$ и далее записать конечные выражения для групповой скорости v_g и коэффициента хроматической дисперсии D также в аналитическом виде. Кроме того, получены аналитические формулы для фактора оптического ограничения P_{co} , известного также как часть мощности моды, переносимой в сердцевине ОВ, и поляризационной поправки $\delta \beta$ к скалярной постоянной распространения и ее производных.

Таким образом, разработанный приближенный метод ОМПГ обеспечивает возможность расчета спектральных характеристик параметров передачи направляемых мод произвольного порядка, распространяющихся в слабонаправляющих волоконных световодах с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления. Здесь каждой направляемой моде LP_{lm} соответствует одно характеристическое уравнение относительно R_0 и вариационное выражение для квадрата волноводного параметра моды в сердцевине U^2 , непосредственно связанного с постоянной распространения β известным соотношением, записанные с учетом значений азимутального l и радиального порядков m . В результате снимаются вопросы однозначной идентификации моды, в отличие от сеточных и ряда известных приближенных методов.

Кроме того, в ОМПГ для расчета параметров передачи моды заданного порядка, полностью определяемых базовым вариационным параметром R_0 , необходимо решить только одно характеристическое уравнение (2), а не систему уравнений. Это существенно уменьшает число нефизических решений, а также значительно упрощает их выявление, которое предлагается реализовать с помощью двух введенных критериев для направляемых мод: а) известного условия отсечки и б) неравенства $P_{co} \geq 0,5$.

Благодаря записи вариационного выражения (1) и характеристического уравнения (2) в аналитическом виде на основе конечных вложенных сумм, ОМПГ выгодно отличается быстродействием. Например, время расчета приближенного значения постоянной распространения одной направляемой моды вне зависимости от ее порядка, распространяющейся в ОВ категории ОМ2, для представления профиля которого использовалось свыше 300 промежуточных слоев от центра сердцевины до границы раздела сердцевины/оболочка (рис. 1), на одной оптической несущей с учетом локализации

нефизических решений составляет не более 1 с при следующих параметрах ПЭВМ: процессор AMD Phenom™ II x4 965 3,4 ГГц, ОЗУ 4 Гб.

Для оценки погрешности разработанного приближенного метода ОМПГ предварительно было проведено сопоставление полученных данных с результатами расчета модельных волоконных световодов с идеальными ступенчатым и неограниченным параболическим профилями показателя преломления, которые соответствуют точным решениям скалярного волнового уравнения. Для этой цели были построены кривые спектральной зависимости нормированной постоянной распространения $b(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda=800\dots1350$ нм для мод с азимутальным порядком $l=0\dots2$ многомодовых ОВ 50/125 с указанными модельными профилями. Сопоставление полученных результатов показало, что для ОВ с идеальным ступенчатым профилем относительная погрешность оценки этого параметра для большинства мод не достигает 1% во всем спектральном диапазоне. Исключение составляют направляемые высшие моды последних радиальных порядков, для которых выполняется условие отсечки, но при этом фактор оптического ограничения $P_{co}=0,5\dots0,6$: в этом случае погрешность в области верхней границы исследуемого диапазона длин волн может несколько увеличиться, относительно низших мод, что объясняется точкой разрыва функции идеального ступенчатого профиля и некоторой неопределенностью идентификации моды «направляемая – вытекающая». Однако и в этом случае погрешность не превышает 5%. В то время, как для волокон с идеальным неограниченным параболическим профилем уже при числе слоев $N=40$ обеспечивается снижение относительной погрешности оценки нормированной постоянной распространения b до 0,4% и менее, вне зависимости от порядка моды во всем исследуемом диапазоне длин волн $\lambda=800\dots1350$ нм.

Далее на основе ОМПГ был выполнен расчет параметров передачи модового состава многомодовых ОВ с градиентными профилями, воспроизведенными на основе данных протоколов измерения промышленных образцов реальных многомодовых ОВ разных поколений (категорий – ОМ2 и ОМ2+/ОМ3) и проведено последующее сопоставление с численным методом смешанных конечных элементов (МСКЭ), адаптированным для анализа многомодовых ОВ. Построены спектральные зависимости групповой скорости $v_g(\lambda)$, коэффициента хроматической дисперсии $D(\lambda)$.

Анализ полученных результатов показал, что значение относительной погрешности оценки нормированной постоянной распространения b в исследуемом диапазоне длин волн $\lambda=800\dots1350$ нм составляет 1,5...2,0% для многомодовых ОВ ОМ2, в зависимости от типа и габаритов центрального дефекта, в то время как для волокон категории ОМ2+/ОМ3 с более гладким профилем расхождение между точными и приближенными результатами составляет менее 0,1%. При этом относительная погрешность оценки групповой скорости v_g модового состава для ОВ ОМ2 не достигает и 0,15%, а для волокон ОМ2+/ОМ3 расхождение между значениями этого параметра, полученного с

помощью ОМПГ и МСКЭ, не превышает 0,08%. В свою очередь, максимальная абсолютная погрешность оценки коэффициента хроматической дисперсии для отдельных мод составляет не более 2,5...3,0 пс/(нм·км) для волокон OM2, также в зависимости от параметров центрального дефекта, а для OM2+/OM3 – не более 0,3...2,0 пс/(нм·км), в зависимости от наличия центрального тонкого пика.

Некоторые результаты оценки погрешности предложенного приближенного метода ОМПГ относительно строгого метода МСКЭ для одного из отобранных образцов многомодового ОВ OM2, профиль показателя преломления которого представлен на рис. 1, приведены на рис. 2.

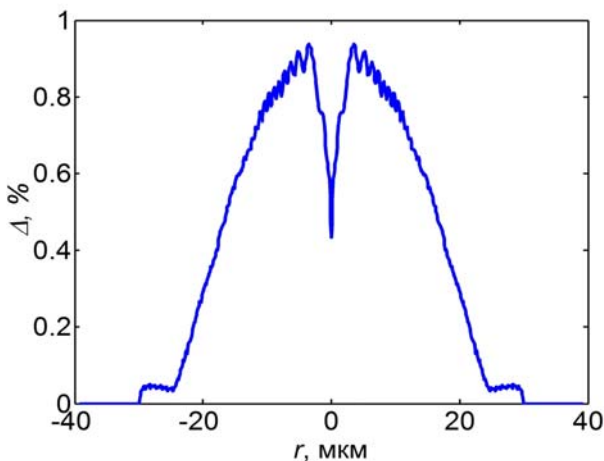


Рисунок 1 – Градиентный профиль показателя преломления промышленного образца многомодового ОВ OM2 с центральным дефектом в виде провала и ступенчатым переходом на границе раздела сердцевина/оболочка (образец №12).

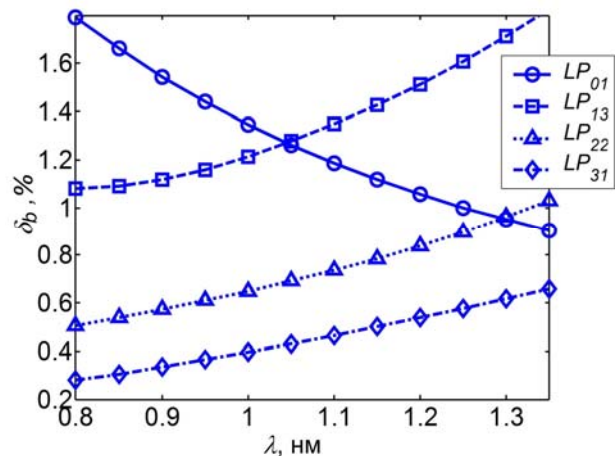


Рисунок 2 – Кривые спектральной зависимости относительного расхождения оценки нормированной постоянной распространения $\delta_b(\lambda)$, полученные с помощью строгого МСКЭ и приближенного ОМПГ методов (образец №12).

Также предложена методика расчета параметров передачи направляемых мод заданного порядка многомодовых волоконных световодов, которая базируется на совместном использовании ОМПГ и численного метода МСКЭ. В отличие от известных решений, здесь предварительно проводится оценка постоянной распространения моды заданного порядка в первом приближении с помощью ОМПГ. Затем на основе эмпирических оценок погрешности ОМПГ относительно МСКЭ определяется диапазон поиска корней системы линейных алгебраических уравнений для данной моды. На последнем этапе искомое значение β уточняется при решении задачи методом МСКЭ в данном диапазоне поиска.

В третьей главе представлено математическое описание возбуждения слабонаправляющих градиентных многомодовых ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, позволяющее учесть особенности ввода сигнала в торец ОВ, в частности, модовый состав сигнала источника излучения, а также наличие/отсутствие осевого или углового расфокусирования. Предложенный подход базируется на расчете коэффициентов

связи мод компонентов вводимого сигнала с модовым составом возбуждаемого ОВ, который реализуется путем совместного применения ОМПГ и известного метода интеграла перекрытия полей. Это позволило получить достаточно громоздкие, содержащие несколько конечных вложенных сумм, но при этом аналитические формулы для оценки коэффициентов связи мод произвольного порядка на стыке двух слабонаправляющих ОВ с неодинаковыми параметрами, выполненном с осевым смещением, и более компактное выражение для этого же случая стыка ОВ, но с введенным малым угловым рассогласованием θ , которое имеет вид:

$$\eta_{mn}^{(\theta)} = 4 \frac{(m-1)!}{(l_m+m-1)!} \frac{(n-1)!}{(l_n+n-1)!} \left\{ \sum_{p=0}^{m+n-2} \sum_{q=\max(0, p-n+1)}^{\min(p, m-1)} b_q^{(l_m, m-1)} b_{p-q}^{(l_n, n-1)} \times \right. \\ \times \frac{2^{\frac{l_m+p}{2}} (k_0 n_\theta \theta)^{l_n} \Gamma\left(\frac{l_m}{2} + l_n + p + 1\right)}{(\rho_m^2 + \rho_n^2)^{\frac{l_m+l_n+p+1}{2}} (l_n)!} \rho_m^{2(l_n+p-q)+1} \rho_n^{l_m+l_n+2q+1} \times \\ \left. \times {}_1F_1\left[\left(\frac{l_m}{2} + l_n + p + 1\right), (l_n + 1); -(k_0 n_\theta \theta)^2 \frac{\rho_m^2 \rho_n^2}{(\rho_m^2 + \rho_n^2)}\right]\right\}^2, \quad (3)$$

где l_m и l_n – азимутальные, m и n – радиальные порядки падающей моды m и возбуждаемой моды n , соответственно; ρ_m и ρ_n – радиусы пятна мод m и n , соответственно; n_θ – значение показателя преломления среды, из которой поступает возбуждающая мода (сердцевина согласующего/возбуждающего световода, воздушный зазор и др.); ${}_1F_1$ – вырожденная гипергеометрическая функция.

На основании предложенного подхода проведено моделирование ввода оптического сигнала с выхода одномодового ЛД в градиентные многомодовые ОВ с использованием в качестве согласующего световода стандартное одномодовое ОВ SSF (Standard Singlemode Fiber, рек. ITU-T G.652). Выявлено, что при вводе сигнала с выхода одномодового ЛД на длине волны $\lambda=1310$ нм через ОВ SSF в условиях центрированного ввода или ввода с осевым смещением в многомодовом ОВ возбуждаются не только моды нулевого LP_{0m} , но и первого LP_{1m} азимутальных порядков.

Показано, что наиболее оптимальным, с точки зрения снижения DMD за счет уменьшения общего числа модовых составляющих распространяющегося в многомодовом ОВ оптического сигнала, является реализация центрированного ввода излучения с выхода ЛД ($\lambda=1310$ нм) в волокно многомодовой ВОЛП через SSF. В этом случае основная мощность введенного сигнала переносится только шестью направляемыми модами LP_{lm} ($l=0, 1; m=1\dots3$).

Проведены теоретические исследования потенциальных возможностей использования одномодовых ОВ с увеличенным диаметром пятна моды LMA для согласования лазерных источников – ЛД и VCSEL – с многомодовыми ОВ, результаты которых продемонстрировали эффективность их применения как для реализации централизованного ввода с выравниванием диаметра пятна основной моды ввода MFMCL, так и ввода с равномерной засветкой торца сердцевины многомодового ОВ ROFL.

Получены оптимальные значения эквивалентных, в рамках приближения Гаусса, радиусов пятна моды волокон LMA для заданных длин волн ($\lambda=850$ нм и $\lambda=1310$ нм), которые являются универсальными для типовых градиентных многомодовых ОВ как категории OM2, так и OM2+/OM3 вне зависимости от наличия и характера центрального дефекта профиля показателя преломления. Так, ввод MFMCL с применением одномодовых ОВ LMA может быть реализован при эквивалентных значениях радиуса пятна моды $\rho_{0(LP01)}=3,7\dots4,7$ мкм для $\lambda=850$ нм и $\rho_{0(LP01)}=4,5\dots6,0$ мкм для $\lambda=1310$ нм. При этом такой ввод является достаточно устойчивым к осевым смещениям и вплоть до $5\dots7$ мкм, в зависимости от оптической несущей λ , сохраняет свои свойства. В свою очередь, ввод ROFL может быть реализован путем подключения лазера через ОВ LMA с эквивалентным радиусом пятна моды $\rho_{0(LP01)} > 20$ мкм, как в первом, так и во втором окнах прозрачности.

Разработано математическое описание ввода оптического сигнала с выхода лазера VCSEL в многомодовое ОВ. Анализ работ, посвященных моделированию источников данного типа, показал, что традиционный VCSEL, применяемый в коммерческих трансиверах, функционирующих на длине волны $\lambda=850$ нм, излучает маломодовый оптический сигнал, содержащий до 6 модовых компонентов примерно одинаковой амплитуды вплоть до 3-го азимутального порядка ($l = 0\dots3$) включительно. При этом формируется световой пучок, радиус которого в ближнем поле r_{VCSEL} варьируется от 2 до 7 мкм, в зависимости от положения согласующей линзы относительно излучающей поверхности источника и торца многомодового ОВ. Последующее сопоставление кривых радиального распределения полей мод, представленных в ряде известных публикаций, по результатам сканирования ближнего поля селективного вывода отдельных модовых компонентов из общего светового пучка VCSEL, и аналогичных зависимостей $F_m^{(l)}(r)$, построенных в рамках приближения Гаусса, позволило сделать заключение о равенстве радиусов пятна моды для всех перечисленных 6 компонентов сигнала.

Предложена методика перехода от радиуса пятна светового пучка лазера VCSEL в ближнем поле r_{VCSEL} к некоторому обобщенному, в рамках приближения Гаусса, радиусу пятна моды ρ_0 , одинаковому для всех модовых компонентов оптического сигнала. На основании предложенного подхода были локализованы границы искомого диапазона значений $\rho_0 = 0,6\dots2,1$ мкм, соответствующие $r_{VCSEL} = 2\dots7$ мкм, что позволило далее для моделирования

ввода сигнала с выхода VCSEL в многомодовое ОВ использовать предложенный подход на основе комбинации ОМПП и метода интеграла перекрытия полей.

Проведены расчеты амплитуд направляемых мод, возбуждаемых в многомодовом ОВ 6-компонентным сигналом VCSEL, как для централизованного ввода, так и в условиях осевого или углового рассогласований. Показано, что в первых двух случаях в многомодовом ОВ сигнал переносится 32-мя модовыми компонентами LP_{lm} ($l = 0...3$; $m = 1...7, 8, 9$). Наличие углового рассогласования приводит к появлению мод еще более высоких ($l > 3$) азимутальных порядков. Разброс амплитуд модового состава возбуждаемого многомодового ОВ также достаточно большой. Величина и характер распределения последнего зависит не столько от наличия и величины рассогласования, сколько от значения ρ_0 модовых компонентов сигнала VCSEL, которые, как минимум, в 2 раза меньше радиусов пятна направляемых мод многомодового ОВ, а также параметров самого возбуждаемого ОВ – в частности, особенностей профиля показателя преломления.

В четвертой главе разработана модель кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП, функционирующей в маломодовом режиме, которая, в отличие от известных решений, совместно учитывает DMD и хроматическую дисперсию основной и высших направляемых мод, а также процессы взаимодействия и смешения модовых компонентов оптического сигнала, обусловленные нерегулярной структурой реальных промышленных многомодовых ОВ, а также наличием микро- и макроизгибов волокон в оптических кабелях, неизбежно возникающих при инсталляции соединительных линий сети. Модель базируется на кусочно-регулярном представлении и использует общий подход метода расщепления по физическим процессам.

Так, в пределах регулярного сегмента заданной длины Δz геометрия световода – например, радиус сердцевины, параметры профиля показателя преломления и пр. – остаются постоянными, связь мод отсутствует, а модовые компоненты сигнала распространяются независимо друг от друга. Предполагается, что каждая направляемая мода, постоянная распространения которой, изменяясь от сегмента к сегменту, удовлетворяет условию отсечки для всех регулярных световодов, составляющих исследуемое ОВ, переносит одиночный импульс заданной формы, идентичной вводимому сигналу (например, гауссовой). В пределах регулярного сегмента амплитуда импульса уменьшается за счет собственных потерь моды.

Границы регулярных сегментов могут рассматриваться в виде идеального централизованного соединения двух подобных световодов с неодинаковыми параметрами для случая «прямолинейных» волокон. В свою очередь, для учета наличия изгибов волокон границу регулярных сегментов предлагается рассматривать в виде соединения двух подобных ОВ с некоторым заданным эквивалентным малым угловым рассогласованием θ . Перераспределение мощности сигнала между амплитудами отдельных составляющих как

результат взаимодействия и смешения модового состава определяется путем оценки коэффициентов связи на вышеописанных стыках.

Для устранения проблемы энтропии генераторов случайных чисел ПЭВМ, вариации диаметра сердцевины исследуемого ОВ предлагается задавать непосредственно в соответствии с протоколами измерений датчиков контроля диаметра ОВ, снятых в процессе его вытяжки, опубликованные в известных источниках.

На приемную сторону указанные импульсы приходят с определенной задержкой относительно друг друга, обусловленной разбросом значений групповых скоростей направляемых мод. В случае появления новой модовой компоненты форма переносимого данной модой сигнала представляет собой результат сложения гауссовых импульсов всех направляемых мод, которые непосредственно передали часть своей мощности указанной составляющей пропорционально соответствующему значению коэффициента связи. На приемной стороне результирующая огибающая импульса рассматривается как суперпозиция всех существующих модовых компонентов сигнала.

Таким образом, в рамках предложенного кусочно-регулярного представления многомодовой ВОЛП, частотный отклик оптического сигнала, переносимого M модовыми компонентами LP_{lm} в нерегулярном многомодовом ОВ общей протяженностью z при выбранной длине регулярного сегмента Δz вблизи несущей частоты ω_0 может быть описан выражением вида:

$$H_{\text{вых}}(\omega, z) = F[h_{\text{вх}}(t)] \sum_p^M A_{(N_z+1)}^{(p)} \exp[-\alpha_{(N_z+1)}^{(p)}(z - N_z \Delta z)] \times \quad (4)$$

$$\times \exp[-j(\omega - \omega_0) \tau_3^{(p; N_z+1)}(z - N_z \Delta z)] \exp\left[-j \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta_2^{(p; N_z+1)}(z - N_z \Delta z)\right] \times$$

$$\times \prod_{q=1}^{N_z} A_q^{(p)} \exp(-\alpha_q^{(p)} \Delta z) \exp(-j(\omega - \omega_0) \tau_3^{(p; q)} \Delta z) \exp\left(-j \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta_2^{(p; q)} \Delta z\right),$$

где F – прямое преобразование Фурье; $h_{\text{вх}}(t)$ – импульс на входе многомодового ОВ; $N_z = E(z/\Delta z)$; $E(x)$ – целая часть от действительного числа x ; $A_q^{(p)}$ и $\alpha_q^{(p)}$ амплитуда и коэффициент затухания p -й направляемой моды LP_{lm} ($p=1 \dots M$) на q -ом регулярном сегменте; $\beta_2^{(p; q)}$ – дисперсионный параметр p -й направляемой моды LP_{lm} на q -ом регулярном сегменте, который является 2-м элементом разложения частотной зависимости постоянной распространения $\beta(\omega)$ в ряд Тейлора – хорошо известного алгоритма записи основного уравнения распространения, где первый элемент ряда – это непосредственно задержка p -й направляемой моды на q -ом сегменте $\beta_1^{(p; q)} = \tau_3^{(p; q)}$, в то время как второй параметр $\beta_2^{(p; q)}$ позволяет учесть вклад хроматической дисперсии.

Соответственно, результирующий импульсный отклик сигнала на выходе исследуемого нерегулярного многомодового ОВ $h_{\text{вых}}(t)$ определяется по общеизвестной формуле: $h_{\text{вых}}(t) = F^{-1}(H_{\text{вых}}(\omega)) \cdot [F^{-1}(H_{\text{вых}}(\omega))]^*$, где F^{-1} – обратное преобразование Фурье; $[x]^*$ – комплексно сопряженное число.

Проведена экспериментальная апробация предложенной модели. Для этой цели на длине волны $\lambda=1310$ нм были выполнены измерения DMD промышленных образцов многомодовых ОВ разных поколений категории OM2 и OM2+/OM3, представляющие собой бухты или катушки ОВ длиной 200...400 м каждая, которые включали в себя ввод в испытываемое ОВ на ближнем конце оптического импульса малой длительности $\tau_{05}=340$ пс квази-гауссовой формы, генерируемого одномодовым ЛД, и последующий анализ отклика на дальнем конце. На первом этапе ввод излучения с выхода ЛД, оконцованного пигтейлом, в многомодовое ОВ осуществлялся через типовую оптическую розетку. На втором этапе выполнялось пошаговое сканирование радиального сечения сердцевины тестируемого ОВ с шагом 0,5 мкм этим же одномодовым ЛД, которое реализовывалось путем сварки второго одномодового пигтейла, подключенного ко входу ЛД через розетку, с многомодовым ОВ по соответствующим образом скорректированной программе сварочного аппарата в режиме «аттенюатор».

Предварительно на базе НЦВО при ИОФ РАН (г. Москва) для каждого испытываемого образца многомодового ОВ были проведены измерения профиля показателя преломления с помощью прецизионного лабораторного анализатора световодов, реализующего метод ближнего поля.

Некоторые результаты сопоставления модельной и измеренной нормированной формы импульсного отклика маломодового оптического сигнала для ОВ №12 (профиль приведен на рис. 1) без контроля условий ввода и для ввода с заданным осевым смещением $d=23,5$ мкм представлены на рис. 3.

Анализ полученных результатов показал хорошее совпадение модельной и измеренной форм импульсного отклика. При этом, если для градиентных волокон, как категории OM2, так и OM2+/OM3, профиль которых отличается наличием центрального пика, наибольшее расхождение по отдельным параметрам сигнала – положение и разброс амплитуд между главным и периферийным максимумами, *DMD* или дисперсии в целом – составляет менее 20%, то для образцов многомодовых ОВ с центральным провалом профиля категории OM2 и с профилем без дефектов категории OM2+/OM3 погрешность не превышает 10%.

На основании модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП и разработанной на ее базе методики расчета импульсного отклика маломодового сигнала проведено моделирование распространения маломодовых оптических сигналов 10G в кусочно-регулярных многомодовых ВОЛП с ОВ категории OM2 и OM2+/OM3 с разными центральными дефектами профиля показателя преломления без каких-либо специализированных устройств согласо-

ния через типовую оптическую розетку. Выполнена оценка максимальной длины линии, в пределах которой оптический импульс сохраняет свою огибающую, при этом сильное проявление эффекта DMD отсутствует. Наибольшие значения составили: 70 м – для ОВ ОМ2 и 270 м – для ОВ ОМ2+/ОМ3 на длине волны $\lambda=850$ нм; 90 м – для ОМ2, 280 м – для ОМ2+/ОМ3 при $\lambda=1310$ нм, соответственно. Анализ полученных результатов наглядно продемонстрировал необходимость применения методов и средств по снижению DMD, особенно для многомодовых ОВ ОМ2.

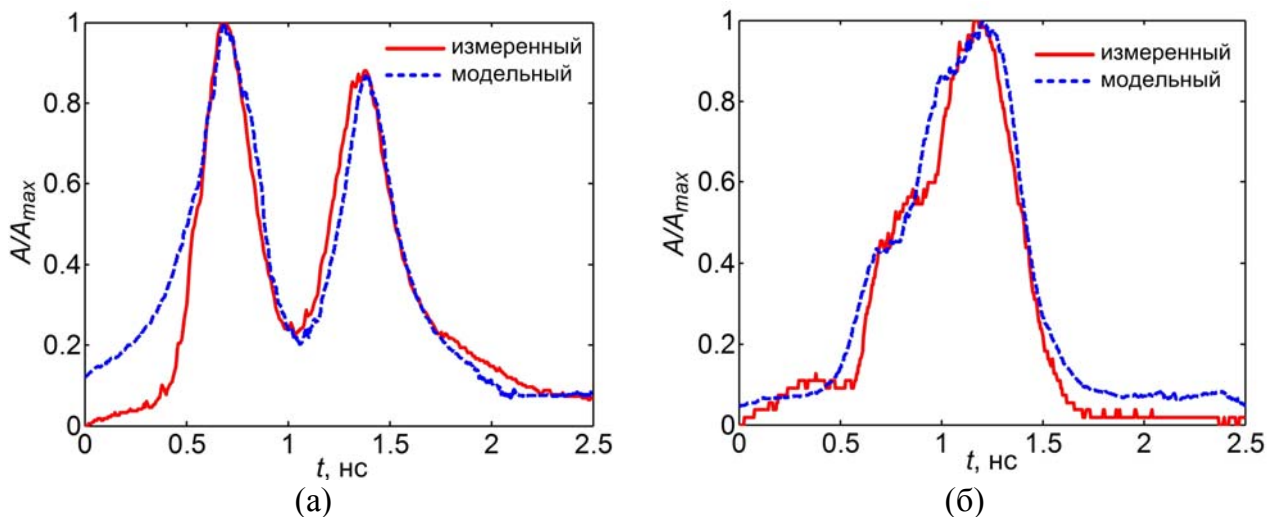


Рисунок 3 – Сопоставление модельной и измеренной нормированной формы импульсного отклика маломодового сигнала ЛД ($\lambda = 1310$ нм) на выходе многомодового ОВ №12 (профиль – см. рис. 1): (а) ввод через оптическую розетку; (б) ввод через одномодовое ОВ SSF с прецизионным осевым смещением $d=23,5$ мкм.

Выявлено, что для ОВ с центральным дефектом профиля в виде пика эффект DMD проявляется сильнее (более чем в 2 раза), по сравнению с ОВ с центральным провалом профиля показателя преломления: в среднем, значение задержки для указанных волокон достигает 3,22 нс/км и 1,53 нс/км, соответственно.

В пятой главе проведены экспериментальные, а также, на основании разработанной математической модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП, теоретические исследования чувствительности многомодовых ОВ первого поколения к внешним локальным и распределенным механическим воздействиям при передаче маломодовых оптических сигналов. Выявлено, что в многомодовых ОВ категории ОМ2 с центральным пиком профиля искаженная, в основном за счет DMD, форма импульсного отклика остается более стабильной при внешних воздействиях, по сравнению с волокнами с центральным провалом профиля. На основании полученных результатов разработаны практические рекомендации по отбору ОВ ОМ2 в зависимости от типа центрального дефекта профиля показателя преломления для ВОЛП мультигигабитных КМС или, напротив, сенсоров волоконно-оптических датчиков.

На основании проведенных теоретических исследований в соавторстве разработаны подтвержденные соответствующими патентами способы идентификации многомодовых ОВ с повышенной DMD, компенсации DMD и увеличения пропускной способности многомодовой ВОЛП в режиме передачи маломодовых сигналов, описание которых представлено в данной главе.

Предложен универсальный подход к построению устройств для увеличения пропускной способности многомодовых ВОЛП в маломодовом режиме передачи оптических сигналов. В отличие от известных решений, данный подход, в общем случае, базируется на выборе параметров элементов конструкции устройства таким образом, чтобы обеспечивалось воспроизведение заданной базовой диаграммы групповых скоростей отдельных направляемых мод, число и порядок которых непосредственно определяются исходным модовым составом излучения на выходе источника и условиями ввода.

На основе данного подхода разработан способ компенсации DMD многомодовой ВОЛП при передаче маломодовых сигналов, который базируется на последовательном включении основного многомодового ОВ линии и компенсирующего многомодового ОВ RD MDF, и метод моделирования таких волокон. Конструкция предлагаемого компенсирующего кварцевого многомодового ОВ RD MDF является традиционной и представляет собой сердцевину диаметром 50 мкм, окруженную внешней сплошной оболочкой. При этом профиль показателя преломления и длину компенсирующего волокна RD MDF предлагается выбирать из условия минимизации некоторой функции F , определяемой следующим выражением:

$$F = \sum_{j=1}^M \left(v_{g(j)}^{(R)} - v_{g(j)}^{(i)} \right)^2, \quad (5)$$

где $v_{g(j)}^{(R)}$ – искомое значение групповой скорости j -ой моды $LP_{lm}^{(j)}$ базовой реверсивной диаграммы; $v_{g(j)}^{(i)}$ – значение групповой скорости этой же j -ой моды $LP_{lm}^{(j)}$ аналогичного порядка, полученное в результате анализа ОВ с профилем i -ой итерации; M – число направляемых мод, переносящих мощность маломодового оптического сигнала в основном многомодовом волокне, для которых параметр мощности моды в сердцевине составляет не менее $P_{co(j)} \geq 0,5$, а нормированная амплитуда – не менее 0,1. Как было отмечено выше, значение M определяется двумя следующими факторами: условиями ввода сигнала с выхода лазера в основное многомодовое ОВ линии передачи и модовым составом излучения, которое формируется непосредственно на выходе источника и зависит от типа лазера и его соответствующих характеристик. Учитывая особенности маломодового режима, в общем случае, M не превышает 50.

Искомое реверсивное значение групповой скорости j -й моды $LP_{lm}^{(j)}$ компенсирующего многомодового волокна RD MDF относительно групповой скорости моды этого же порядка, распространяющейся в основном многомодовом

довом ОВ линии передачи, предлагается оценивать на основе следующего соотношения:

$$v_{g(j)}^{(R)} = v_{g(\max)} - Q \cdot (v_{g(j)} - v_{g(\min)}); \quad j = 1 \dots M, \quad (6)$$

где $v_{g(\max)}$, $v_{g(\min)}$ – максимальное и минимальное значения групповых скоростей M модовых составляющих маломодового сигнала ($j=1 \dots M$), распространяющегося в основном многомодовом волокне линии передачи; $Q=L_{\text{лин}}/L_{\text{комп}}$ – параметр компенсации, определяющий длину волокна RDMDF. Для минимизации функции (5) предлагается использовать симплексный метод Нелдера-Мида, эффективность которого была продемонстрирована в известных работах А.Н. Боголюбова и А.Г. Свешникова, посвященных решению задач синтеза волоконных световодов с заданными характеристиками. Многократное решение прямой задачи анализа кварцевого многомодового ОВ на каждом этапе итерации минимизации осуществляется с помощью разработанного приближенного метода ОМПГ.

Аналогичным образом, на основе предложенного подхода разработан способ уменьшения DMD в многомодовых ОВ, который базируется на применении ОВ со специализированной формой профиля, обеспечивающей выравнивание групповых скоростей направляемых мод заданного порядка, и метод моделирования таких многомодовых волокон LDMDF. Здесь также при выборе профиля показателя преломления учитывается исходный модовый состав оптического излучения, поступающего с выхода лазерного источника в многомодовое ОВ, и непосредственно сами условия ввода сигнала. Однако в этом случае форма профиля показателя преломления искомого ОВ LDMDF выбирается таким образом, чтобы минимизировать функцию F , которая в данном случае описывается выражением вида:

$$F = \sum_{j=1}^M (v_{g(j)} - \overline{v_g})^2, \quad (7)$$

где $v_{g(j)}$ – искомое значение групповой скорости j -ой моды $LP_{lm}^{(j)}$ базовой диаграммы $\overline{v_g}$ – некоторое опорное значение групповой скорости, относительно которого и осуществляется выравнивание групповых скоростей направляемых мод LP_{lm} заданных порядков. При этом, в отличие от известных решений, значение $\overline{v_g}$ предлагается выбирать из диапазона значений диаграммы групповых скоростей многомодовых ОВ последних поколений ОМ2+...ОМ4.

На основе представленных методов моделирования разработаны методики синтеза градиентных профилей показателя преломления многомодовых ОВ RDMDF и ОВ LDMDF. Проведена теоретическая апробация предложенного подхода. Получены профили показателя преломления ОВ RDMDF, обеспечивающие компенсацию DMD как в основных многомодовых ОВ категории ОМ2, так и ОМ2+/ОМ3 при значении параметра компенсации $Q=1$

(некоторые результаты приведены на рис. 4), а также профили волокон LD MDF при неконтролируемом вводе, центрированном вводе и вводе MFMCL сигнала с выхода VCSEL и ЛД на оптических несущих $\lambda=850$ нм и $\lambda=1310$ нм, соответственно. Для всех полученных профилей максимальное относительное расхождение значений групповой скорости базовой реверсивной диаграммы и диаграммы групповых скоростей профиля, в случае ОВ RD MDF, и максимальное относительное расхождение групповых скоростей мод заданного порядка относительно опорного значения, в случае ОВ LD MDF, составило менее 0,01%. Предложенные способы компенсации DMD многомодовых ВОЛП в маломодовом режиме и уменьшения DMD в многомодовых ОВ подтверждены соответствующими патентами.

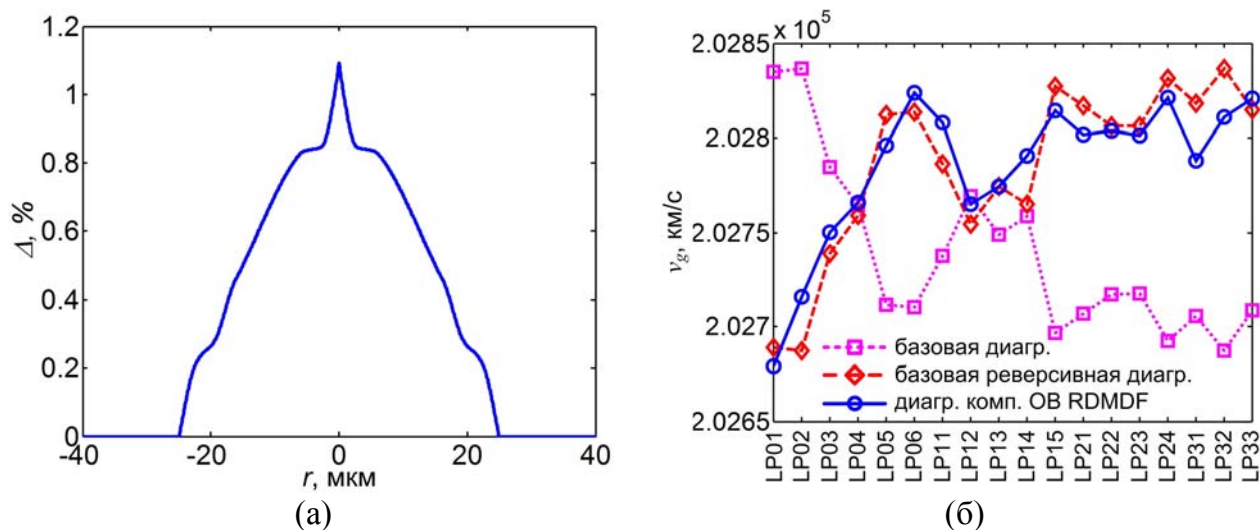


Рисунок 4 – Результаты моделирования компенсирующего ОВ RD MDF (основное ОВ OM2, образец №12 – профиль с центральным провалом (см. рис. 1), при центрированном вводе сигнала VCSEL ($\lambda = 850$ нм): (а) профиль показателя преломления ($Q=1$); (б) диаграммы групповых скоростей модового состава маломодового сигнала.

С помощью разработанной модели кусочно-регулярной многомодовой ВОЛП проведен расчет динамики оптических импульсов ВОСП 10G и 40G в последовательном оптическом интерфейсе в маломодовом режиме на оптических несущих $\lambda=850$ нм и $\lambda=1310$ нм, распространяющихся в многомодовой ВОЛП с компенсаторами DMD на базе волокон RD MDF, а также ВОЛП с многомодовыми ОВ LD MDF, в том числе при центрированном вводе и вводе MFMCL, реализованном на базе промышленных одномодовых ОВ LMA, сигнала с выхода VCSEL и ЛД. Кроме того, на основе известной методики, выполнен расчет огибающей глаз-диаграммы и проведена оценка Q-фактора/*BER* канала связи, организованного ВОСП 10/40G-SX/LX и многомодовой ВОЛП, составленной из последовательного включения основного ОВ OM2/(OM2+/OM3) и компенсирующего ОВ RD MDF, а также многомодовой ВОЛП с волокнами LD MDF для перечисленных выше условий ввода. Полученные результаты проведенного теоретического исследования продемонстрировали возможность увеличения пропускной способности многомодовой ВОЛП.

довых ВОЛП в маломодовом режиме при использовании компенсирующих ОВ RDMDMF.

Так, предложенный способ компенсации DMD позволяет увеличить пропускную способность, для оценки которой в ряде известных публикаций зарубежных авторов применяется параметр BDP (Bandwidth-Distance-Product – буквально соотношение «пропускная способность – расстояние»), маломодовых ВОЛП инфокоммуникационных КМС до $4,5 \dots 20$ ((Гбит/с)·км) для длины волны $\lambda=850$ нм и до $5,5 \dots 32$ ((Гбит/с)·км) для длины волны $\lambda=1310$ нм при центрированном вводе, в зависимости от категории основного ОВ линии и параметров технологических дефектов профилей показателя преломления. Это в $5,4/1,8$ раза больше для ОВ OM2 и более чем в $3,3/3,5$ раза больше для ОВ последних поколений OM2+...OM4 относительно исходного значения полосы пропускания, соответствующего спецификациям «SX»/«LX» перечисленных выше ратифицированных стандартов IEEE.

В свою очередь, совместное применение ОВ RDMDMF и ввода MFMCL позволяют получить еще более высокие результаты. В этом случае значение BDP составляет более $25,2/34,0$ ((Гбит/с)·км) для волокон OM2+/OM3 на длинах волн $\lambda=850/1310$ нм, также в зависимости от параметров основных ОВ линии, что в $4,2/3,8$ раз больше максимального значения этого же параметра, регламентированного соответствующими спецификациями «SX»/«LX» для многомодовых ОВ категории OM2+...OM4. В то время как для многомодовых ОВ первого поколения категории OM2 пропускная способность ВОЛП составляет более $32,0/38,0$ ((Гбит/с)·км), что не менее, чем в $39,0/12,6$ раз больше исходного максимального значения BDP , ограниченного спецификациями IEEE «SX»/«LX», соответственно.

Для маломодовых ВОЛП КМС с волокнами LDMDMF в сочетании с центрированным вводом пропускная способность достигает значений не менее $12,80$ и $15,20$ ((Гбит/с)·км) для длин волн $\lambda=850$ и 1310 нм, соответственно, что более чем в $2,1$ и $1,7$ раз больше BDP спецификаций «SX» и «LX», установленных для многомодовых ОВ OM2+...OM4. При этом совместное применение предложенных ОВ LDMDMF с вводом MFMCL обеспечивает увеличение пропускной способности таких ВОЛП уже до $40,0/70,0$ ((Гбит/с)·км), что в $6,7/7,8$ раз больше упомянутых спецификаций «SX»/«LX» IEEE.

Разработана методика построения эквивалентного градиентного профиля показателя преломления многомодовых ОВ категории OM2 по диаграмме групповых скоростей модового состава, восстановленной по результатам анализа формы импульсного отклика маломодового оптического сигнала на выходе исследуемого многомодового ОВ. Здесь так же, как и для RDMDMF, профиль показателя преломления выбирается из условия минимизации функции F , определяемой выражением (5). Однако в данном случае уже рассматривается сумма квадратов разности значений групповых скоростей прямой базовой диаграммы и групповых скоростей этих же направляемых мод профиля текущей итерации. В отличие от известных решений, на

каждой итерации синтеза профиля анализ ОВ осуществляется с помощью предложенного приближенного метода ОМПП, не использующего представление профиля в виде одной или совокупности гладких степенных функций. Поэтому полученный эквивалентный профиль отличается высокой детализацией и хорошим совпадением с оригинальной формой профиля показателя преломления образца реального многомодового ОВ при одновременно малых требованиях, предъявляемых к вычислительным ресурсам. Это в том числе достигается за счет использования в качестве начальных данных первой итерации некоторого примитивного профиля с заданным центральным дефектом (провалом или пиком), идентифицированным по форме импульсного отклика, что также является отличительной особенностью предложенной методики. Проведена апробация предложенной методики, построены эквивалентные профили показателя преломления для промышленных образцов многомодовых ОВ категории OM2 с центральным дефектом профиля в виде провала и пика. Максимальное отклонение диаграммы групповых скоростей построенных эквивалентных профилей относительно базовых не превышает 0,01%, а относительное расхождение локального значения показателя преломления между оригинальным и эквивалентным профилями составляет менее 1%.

В заключении перечислены основные научные и практические результаты работы.

В приложениях приведены анализ состояния вопроса инсталляции многомодовых ВОЛП на инфокоммуникационных КМС зарубежных и отечественных предприятий; ретроспектива развития многомодовых сегментов отечественных инфокоммуникационных сетей; обзор и анализ основных факторов искажений оптических сигналов при распространении по многомодовым ОВ в маломодовом режиме; обзор методов измерения параметров широкополосности многомодовых ОВ; классификация многомодовых ОВ; обзор многомодовых ОВ для компенсации DMD; результаты моделирования многомодовых ОВ RDMDF; обзор многомодовых ОВ с увеличенной полосой пропускания; результаты моделирования маломодовых ВОЛП КМС с компенсацией DMD на основе волокон RDMDF, а также ВОЛП с волокнами LDMDF, при вводе MFMCL; документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан приближенный метод ОМПП анализа слабонаправляющих волоконных световодов, использующий сочетание приближения Гаусса и метода стратификации. На основании предложенного метода ОМПП впервые получены аналитические выражения производных постоянной распространения, позволяющие провести расчет спектральных характеристик дисперсионных параметров направляемых мод произвольного порядка кварцевых слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, в том числе сложной формы с локальными техноло-

гическими дефектами и флуктуациями показателя преломления, соответствующей промышленным образцам многомодовых ОВ.

2. Разработана универсальная методика анализа соединения неодинаковых ОВ, основанная на совместном применении предложенного приближенного метода и метода интеграла перекрытия полей. Впервые получены аналитические формулы, позволяющие провести расчет коэффициентов связи направляемых мод произвольного порядка на соосном стыке, либо стыке с рассогласованием кварцевых слабонаправляющих ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления, с учетом влияния введенного осевого смещения или углового рассогласования торцов соединяемых ОВ, на заданной оптической несущей или в исследуемом диапазоне длин волн.

3. Разработаны математические модели возбуждения кварцевых слабонаправляющих многомодовых ОВ когерентными источниками оптического излучения (одномодовым ЛД, маломодовым VCSEL), отличающиеся учетом исходного модового состава сигнала на выходе источника и заданных условий ввода сигнала, в том числе параметров согласующего световода и введенного осевого смещения или углового рассогласования и позволяющие провести расчет начального распределения амплитуд возбуждаемых в многомодовом ОВ линии мод, с учетом перечисленных условий ввода, а также особенностей профиля показателя преломления и конструкции ОВ линейного тракта ВОЛП.

4. Предложена математическая модель маломодовой ВОЛП КМС, основанная на кусочно-регулярном представлении с применением общего подхода метода расщепления по физическим процессам, которая, в отличие от известных решений, совместно учитывает исходный модовый состав оптического излучения на выходе когерентного источника, вводимого в ОВ линии, условия ввода сигнала, проявление DMD, хроматической дисперсии, в том числе на модах высших порядков, вариации геометрических параметров ОВ вдоль длины ВОЛП, а также наличие изгибов ОВ. Модель позволяет провести расчет формы импульсного отклика маломодового оптического сигнала на выходе кварцевого слабонаправляющего нерегулярного многомодового ОВ с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления с учетом вышеперечисленных факторов.

5. Предложен универсальный подход к построению устройств для увеличения пропускной способности многомодовых ВОЛП в маломодовом режиме передачи оптических сигналов, который, в отличие от известных решений, базируется на выборе параметров элементов конструкции устройства таким образом, чтобы обеспечивалось воспроизведение заданной базовой диаграммы групповых скоростей отдельных направляемых мод, число и порядок которых непосредственно определяются исходным модовым составом излучения на выходе источника и условиями ввода. На основании предложенного подхода разработаны:

- Способ компенсации DMD многомодовой ВОЛП, базирующийся на последовательном включении основного многомодового ОВ линии и компенсирующего многомодового ОВ RDMDF. Разработаны методика расчета, получены профили показателя преломления волокон RDMDF, разработаны практические рекомендации по выбору профиля показателя преломления и длины компенсирующего многомодового ОВ RDMDF, в зависимости от технологических параметров основного многомодового ОВ линии, типа когерентного источника излучения и условий ввода оптического сигнала, что позволяет в результате компенсировать DMD в маломодовых ВОЛП КМС с учетом вышеперечисленных факторов. Предложенный способ компенсации DMD позволяет увеличить пропускную способность маломодовых ВОЛП инфокоммуникационных КМС с многомодовыми ОВ категории OM2+/OM3 в 3,3...4,2 раза относительно исходного значения, ограниченного ратифицированными спецификациями IEEE «SX»/«LX», в зависимости от параметров источника, условий ввода, в том числе центрированного ввода или ввода MFMCL, а также технологических параметров основного ОВ линии. В свою очередь, для ВОЛП с волокнами первого поколения категории OM2 полоса пропускания может быть увеличена более чем на порядок относительно упомянутых спецификаций IEEE «SX»/«LX».

- Способ уменьшения DMD в кварцевых многомодовых ОВ традиционной конструкции – ОВ LDMDF, основанный на выборе специализированной формы профиля показателя преломления, которая обеспечивает выравнивание групповых скоростей направляемых мод заданного порядка. Разработана методика расчета, получены профили показателя преломления волокон LDMDF, разработаны практические рекомендации по выбору профиля показателя преломления многомодовых ОВ LDMDF, в зависимости от типа когерентного источника излучения и условий ввода оптического сигнала в ОВ линии. Применение предложенных волокон LDMDF на маломодовых ВОЛП инфокоммуникационных КМС позволяет увеличить пропускную способность более чем в 1,7/2,1 раза при центрированном вводе и более чем в 6,7/7,8 раз при вводе MFMCL относительно исходных значений, ограниченных соответствующими спецификациями «SX»/«LX» ратифицированных стандартов IEEE для многомодовых ОВ нового поколения категории OM2+...OM4.

Перспективы дальнейшей разработки темы. В рамках дальнейших исследований планируется развитие ОМПГ на случай анализа ОВ с произвольным сечением; разработка методов увеличения протяженности ВОЛП в маломодовом режиме; исследование потенциальных возможностей согласованного применения оптической и электронной компенсации DMD; исследование потенциальных возможностей применения ОВ, функционирующих в маломодовом режиме, в качестве сенсоров распределенных волоконно-оптических датчиков.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Рецензируемые журналы, входящие в перечень ВАК

1. Бурдин А.В. Погрешность оценки постоянных распространения направляемых мод на основе приближения Гаусса с учетом поляризационной поправки // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – т.4, №2. – С. 26 – 30.
2. Бурдин А.В. Применение многомодовых оптических волокон на высокоскоростных сетях связи // Электросвязь. – 2007. – №4. – С. 66 – 69.
3. Бурдин А.В. О диагностике дифференциальной модовой задержки многомодовых оптических волокон // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – №4. – С. 33 – 38.
4. Андреев В.А., Бурдин В.А., Бурдин А.В. Проблемы и методы локализации участков ВОЛП с повышенной поляризационной модовой дисперсией // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2008. – том 11, №3. – стр. 131 – 139.
5. Бурдин А.В. Синтез многомодовых оптических волокон с реверсивной дифференциальной модовой задержкой // Вестник Казанского Государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2008. – №3(51) – стр. 39 – 44.
6. Бурдин А.В. Технологии оконцевания волокон оптических кабелей СКС и сетей доступа // Вестник связи. – 2008. – №10. – стр. 67 – 72.
7. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Султанов А.Х., Дельмухаметов О.Р. Алгоритм расчета хроматической дисперсии одномодовых ОВ на основе метода смешанных конечных элементов // Инфокоммуникационные технологии. – 2009. – Т.7, №2. – С. 13 – 16.
8. Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – №2. – С. 22 – 27.
9. Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р., Макаров В.С., Яблочкин К.А. Влияние флуктуаций диаметра сердцевины многомодовых оптических волокон на передачу сигналов в маломодовом режиме // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – №3. – С. 12 – 21.
10. Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков на основе комбинации модифицированного приближения Гаусса и метода конечных элементов // Телекоммуникации. – 2010. – №9. – С. 33 – 40.
11. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Маломодовые оптические волокна для линий передачи современных инфокоммуникационных сетей // Вестник Связи. – 2010. – №5. – С. 31 – 35.
12. Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна в современной кабельной инфраструктуре российских инфокоммуникационных сетей // Электросвязь. – 2010. – №4. – стр. 24 – 27.
13. Андреев В.А., Бурдин В.А., Бурдин А.В., Волков К.А. Проблемы и перспективы применения управляемых дисперсией солитонов для реконструкции волоконно-оптических линий связи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Том 13, №3. – С. 92 – 97.
14. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дельмухаметов О.Р., Яблочкин К.А. Приближенные аналитические решения LP_{lm} мод для частных примеров профиля показателя преломления оптического волокна // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т.9, №1. – С. 25 – 33.
15. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Яблочкин К.А. Восстановление эквивалентного профиля показателя преломления оптического волокна по диаграмме дифференциальной модовой задержки // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т.9, №3. – С. 28 – 33.
16. Бурдин А.В., Бурдин В.А. Уравнение для радиуса пятна моды слабонаправляющего оптического волокна // Т-Comm. – 2011. – №8. – С. 31 – 33.
17. Бурдин А.В. Моделирование оптических волокон для минимизации дифференциальной модовой задержки // Электросвязь. – 2011. – №7. – С. 38 – 44.
18. Бурдин А.В., Григоров И.В., Цвейбельман Е.Л. Сравнительный анализ алгоритмов электронной компенсации дисперсии оптических сигналов // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – Т.10, №3. – С. 34 – 37.

19. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Приближенное аналитическое решение для интеграла перекрытия мод соединения оптических волокон с осевым рассогласованием // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Том 15, №2. – С. 53 – 57.

20. Бурдин А.В., Жуков А.Е., Кунтушев Д.В. Система юстировки разрывного оптического соединителя // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Том 14, №1. – С. 469 – 473.

Патенты

21. Патент 226438 Российская Федерация, МПК G02В 6/10. Способ увеличения полосы пропускания многомодовой волоконно-оптической линии передачи / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, А.В. Бурдин (Россия). – №2004114364/09, заявл. 11.05.2004; опубл. 20.11.2005. Бюл. №32. – 5 с.

22. Патент 226439 Российская Федерация, МПК G02В 6/12. Способ увеличения полосы пропускания многомодовой волоконно-оптической линии передачи / В.А. Андреев, В.А. Бурдин, А.В. Бурдин (Россия). – №2004114367/09, заявл. 11.05.2004; опубл. 20.11.2005. Бюл. №32. – 4 с.

23. Патент 2334257 Российская Федерация, МПК G02В 6/14. Способ компенсации дифференциальной модовой задержки многомодовой волоконно-оптической линии передачи / В.А. Бурдин, А.В. Бурдин (Россия). – №2006128678/09, заявл. 07.08.2006; опубл. 20.02.2008. Бюл. №26. – 4 с.

24. Патент 2350987 Российская Федерация, МПК G02В 6/10. Способ увеличения полосы пропускания многомодовой волоконно-оптической линии передачи / В.А. Бурдин, А.В. Бурдин (Россия). – №2007127168/28, заявл. 16.07.2007; опубл. 27.03.2009. Бюл. №9. – 5 с.

25. Патент 2400783 Российская Федерация, МПК G02В 6/14. Способ идентификации многомодового оптического волокна с повышенной дифференциальной модовой задержкой / В.А. Бурдин, А.В. Бурдин, М.В. Дашков (Россия). – №2009106497/28, заявл. 24.02.2009; опубл. 27.09.2010. Бюл. №27. – 5 с.

26. Патент 2468399 Российская Федерация, МПК G02В 6/14. Способ компенсации дифференциальной модовой задержки многомодовой волоконно-оптической линии в режиме передачи маломодовых сигналов / А.В. Бурдин (Россия). – №2010139099/28, заявл. 22.09.2010; опубл. 27.11.2012. Бюл. №33. – 13 с.

27. Патент 2458370 Российская Федерация, МПК G02В 6/14. Способ уменьшения дифференциальной модовой задержки многомодового оптического волокна / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов (Россия). – №2010139745/28, заявл. 27.09.2010; опубл. 10.08.2012. Бюл. №22. – 10 с.

Монографии

28. Андреев В.А., Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна. Теория и приложения на высокоскоростных сетях связи. – М.: Радио и связь, 2004. – 248 с.

29. Бурдин А.В. Маломодовый режим передачи оптических сигналов по многомодовым волокнам: приложения в современных инфокоммуникациях. – Самара: ПГУТИ, 2011. – 274 с.

Другие публикации

30. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдина Т.З. Моделирование DMD и опыт адаптации инсталлированных многомодовых ВОЛП городских сетей связи под технологию Gigabit Ethernet // Proceedings of SPIE. – 2003. – т. 5247. – С. 491 – 501 (опубл. на англ. яз.).

31. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Моделирование нерегулярных магистральных волоконно-оптических линий передачи с управлением дисперсии // Proceedings of SPIE. – 2003. – т. 5246. – С. 58 – 67 (опубл. на англ. яз.).

32. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Метод оптимизации параметров оптических волокон компенсаторов хроматической дисперсии // Proceedings of SPIE. – 2003. – т. 5246. – С. 695 – 704 (опубл. на англ. яз.).

33. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А. Коэффициенты связи мод на стыке одномодового и многомодового оптических волокон // Фотон-Экспресс. – 2004. – №6(38). – С. 104 – 110.

34. Андреев В.А., Бурдин В.А., Бурдин А.В. Моделирование и анализ отражений на дефекте оболочки оптического волокна // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – т. 5485. – С. 49 – 55 (опубл. на англ. яз.).
35. Бурдин А.В. Сравнительный анализ перераспределения мощности между направляемыми модами типового многомодового оптического волокна при вводе основной моды через одномодовые согласующие световоды USF, DSF и NZDSF // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – т. 5485. – С. 75 – 89 (опубл. на англ. яз.).
36. Бурдин В.А., Белов Ю.Н., Бурдин А.В. Идентификация типа оптического волокна по анализу теплового изображения // *Proceedings SPIE*. – 2004. – т. 5485. – С. 161 – 169 (опубл. на англ. яз.).
37. Бурдин А.В. Анализ многомодовых волоконных световодов с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления на основе модифицированного метода приближения Гаусса // *Компьютерная Оптика*. – 2004. – №26. – С. 7 – 15.
38. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Метод анализа многомодовых оптических волокон с произвольным осесимметричным профилем показателя преломления // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – т. 5854. – С. 118 – 129 (опубл. на англ. яз.).
39. Бурдин А.В. Результаты моделирования искажений оптического импульса при распространении в многомодовых ОВ, возбуждаемых одномодовым лазерным источником излучения // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – т. 5854. – С. 67 – 79 (опубл. на англ. яз.).
40. Бурдин А.В. Поляризация поправка к постоянной распространения при расчете слабонаправляющих оптических волокон с помощью приближения Гаусса // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – т. 6277. – С. 92 – 103 (опубл. на англ. яз.).
41. Бурдин В.А., Бурдин А.В. Метод согласования одномодового источника излучения с многомодовым оптическим волокном // *Фотон-Экспресс*. – 2007. – №6(62). – стр. 34.
42. Бурдин А.В. Метод расчета коэффициентов хроматической дисперсии направляемых мод высших порядков градиентных оптических волокон с одной внешней сплошной оболочкой // *Proceedings of SPIE*. – 2007. – т. 6605. – С. 660509-1 – 660509-13 (опубл. на англ. яз.).
43. Бурдин А.В. Сравнительный анализ характеристик дифференциальной модовой задержки многомодовых оптических волокон, оптимизированных для работы с лазерными источниками // *Proceedings of SPIE*. – 2007. – т. 6605. – С. 66050A-01 – 66050A-09 (опубл. на англ. яз.).
44. Бурдин А.В. Дифференциальная модовая задержка кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений // *Фотон-Экспресс*. – 2008. – №5-6(69-70). – С. 20 – 22.
45. Бурдин А.В. Моделирование многомодовых оптических волокон с реверсивной дифференциальной модовой задержкой // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – т. 7026. – С. 702605-01 – 702605-013 (опубл. на англ. яз.).
46. Бурдин А.В., Прокопьев В.И., Дмитриев Е.В., Яблочкин К.А. Применение типового полевого измерительного оборудования для идентификации многомодовых оптических волокон с повышенной DMD // *Proceedings of SPIE*. – 2009. – т. 7374. – С. 73740J-01 – 73740J-07 (опубл. на англ. яз.).
47. Бурдин А.В. Результаты моделирования распространения маломодового оптического сигнала по многомодовому волокну с периодическим медленно меняющимся диаметром сердцевины // *Proceedings of SPIE*. – 2009. – т. 7374. – С. 737406-01 – 737406-11 (опубл. на англ. яз.).
48. Бурдин А.В., Дашков М.В., Онищенко С.Г., Измайлов А.С. Внутриобъектовые кабели СКС с новым буферным покрытием оптических волокон // *Фотон-Экспресс*. – 2009. – 6(78). – стр. 237 – 238.
49. Бурдин А.В., Григоров И.В. Идентификация параметров широкополосности многомодовых оптических волокон с помощью нелинейных фазовых фильтров // *Фотон-Экспресс*. – 2009. – 6(78). – С. 184 – 185
50. Бурдин А.В. Многомодовые оптические волокна для компенсации дифференциальной модовой задержки // *Фотон-Экспресс*. – 2009. – 6(78). – С. 182 – 183
51. Бурдин А.В. Моделирование распространения маломодового оптического сигнала по многомодовой ВОЛП с компенсаторами дифференциальной модовой задержки // *Proceedings of SPIE*. – 2010. – т. 7523. – С. 752305-1 – 752305-12 (опубл. на англ. яз.).

52. Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р. Исследование влияния дефектов градиентного профиля показателя преломления на дифференциальную модовую задержку // Proceedings of SPIE. – 2010. – т. 7523. – С. 75230С-1 – 75230С-8 (опубл. на англ. яз.).
53. Бурдин А.В., Прапорщиков Д.Е., Яблочкин К.А. Исследование дефектов профилей показателя преломления кварцевых многомодовых оптических волокон // Proceedings of SPIE. – 2011. – т. 7992. – С. 799206-1 – 799206-6 (опубл. на англ. яз.).
54. Бурдин В.А., Бурдин А.В., Яблочкин К.А. Применение специализированных одномодовых оптических волокон для ввода излучения лазерного источника в многомодовое волокно // Proceedings of SPIE. – 2011. – т. 7992. – С. 799207-1 – 799207-6 (опубл. на англ. яз.).
55. Бурдин А.В. Моделирование оптических волокон с уменьшенной дифференциальной модовой задержкой // Proceedings of SPIE. – 2011. – т. 7992. – С. 799208-1 – 799208-12 (опубл. на англ. яз.).
56. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дельмухаметов О.Р. Микроструктурированные многомодовые оптические волокна для компенсации дифференциальной модовой задержки // Proceedings of SPIE. – 2011. – т. 7992. – С. 79920А-1 – 79920А-8 (опубл. на англ. яз.).
57. Бурдин А.В. Теоретические исследования влияния вариации геометрических параметров сердцевины на искажения маломодового оптического сигнала при распространении в кварцевых градиентных многомодовых оптических волокнах с уменьшенной DMD // Proceedings of SPIE. – 2012. – т. 8410. – С. 841002-1 – 841002-10 (опубл. на англ. яз.).
58. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Яблочкин К.А. Реконструкция эквивалентного профиля показателя преломления оптического волокна по диаграмме дифференциальной модовой задержки // Proceedings of SPIE. – 2012. – т. 8410. – С. 84100А-1 – 84100А-6 (опубл. на англ. яз.).
59. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Прапорщиков Д.Е., Яблочкин К.А. Приближенные аналитические решения для частных случаев профилей показателя преломления оптических волокон // Proceedings of SPIE. – 2012. – т. 8410. – С. 84100В-1 – 84100В-12 (опубл. на англ. яз.).
60. Бурдин А.В., Григоров И.В., Цвейбельман Е.Л. Сравнительный анализ алгоритмов электронной компенсации дисперсии оптических сигналов // Proceedings of SPIE. – 2012. – т. 8410. – С. 841003-1 – 841003-10 (опубл. на англ. яз.).
61. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дельмухаметов О.Р. Моделирование оптических волокон для компенсации дифференциальной модовой задержки // Proceedings of SPIE. – 2012. – т. 8283. – С. 82830I-01 – 82830I-010 (опубл. на англ. яз.).
62. Бурдин В.А., Волков К.А., Бурдин А.В. Реконструкция ВОЛП с управлением дисперсией и нелинейностью путем включения оптических кабельных вставок в местах соединения строительных длин оптического кабеля // Proceedings of SPIE. – 2012. – т. 8283. – С. 82830J-1 – 82830J-6 (опубл. на англ. яз.).
63. Бурдин А.В. Связь мод на стыке разнотипных оптических волокон // Proceedings of SPIE. – 2013. – т. 8787. – С. 878706-1 – 878706-12 (опубл. на англ. яз.).
64. Андреев В.А., Бурдин А.В., Жуков А.Е., Прапорщиков Д.Е. Моделирование системы юстировки волоконно-оптических коннекторов линий передачи, подверженных вибрациям // Proceedings of SPIE. – 2013. – т. 8787. – С. 878707-1 – 878707-9 (опубл. на англ. яз.).
65. Бурдин А.В., Бурдин В.А., Прапорщиков Д.Е., Яблочкин, К.А. Экспериментальные исследования дифференциальной модовой задержки многомодовых волоконно-оптических линий передачи // Proceedings of SPIE. – 2013. – т. 8787. – С. 878702-1 – 878702-7 (опубл. на англ. яз.).
66. Бурдин А.В., Дельмухаметов О.Р. Расчет параметров передачи направляемых мод высших порядков с помощью комбинации модификации приближения Гаусса и метода конечных элементов // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – т. 72, №2. – С. 111 – 123 (опубл. на англ. яз.).
67. Бурдин А.В. Моделирование профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон с уменьшенной дифференциальной модовой задержкой // Journal of Optoelectronics Engineering. – 2013. – т.1, №1. – С. 5 – 13 (опубл. на англ. яз.).