

*На правах рукописи*



**Яблочкин Константин Александрович**

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПО  
ДИАГРАММЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДОВОЙ ЗАДЕРЖКИ**

Специальность 05.12.13  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГОБУ ВПО ПГУТИ)

**Научный  
руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
**БУРДИН Владимир Александрович**  
ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики»  
проректор по науке и инновациям

**Официальные  
оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор  
**ГЛУЩЕНКО Александр Григорьевич**  
ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики»  
заведующий кафедрой физики, декан ФБТО

доктор технических наук, профессор  
**МОРОЗОВ Олег Геннадьевич**  
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный  
исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева - КАИ» заведующий кафедрой  
телевидения и мультимедийных систем

**Ведущая организация**

ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный  
университет телекоммуникаций и информатики»

Защита состоится « 29 » июня 2012 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 в Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики».

Автореферат разослан « 25 » мая 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д219.003.02  
доктор технических наук, профессор



Мишин Д.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке алгоритма восстановления профиля показателя преломления многомодового оптического волокна по диаграмме дифференциальной модовой задержки при инсталляции вводимых в эксплуатацию компактных многопортовых инфокоммуникационных сетей.

### **Актуальность темы и состояние вопроса**

В настоящее время многомодовые оптические волокна (МОВ) применяются при реализации таких приложений, как структурированные кабельные системы (СКС), внутрикорпоративные и технологические сети передачи данных, бортовые сети, СКС центров обработки данных (ЦОД) и вычислительных центров (ВЦ), сети хранения данных, а также сети передачи данных систем промышленной автоматизации и многих других. Инфокоммуникационные сети данных приложений отличаются малой протяженностью линий передачи, большим числом портов и относятся к компактным многопортовым (КМ) инфокоммуникационным сетям. На таких сетях из-за разницы стоимости между одномодовыми и многомодовыми оптическими модулями активного оборудования и устройствами ввода более предпочтительно применение лазеров совместно с оптическим кабелем (ОК) с МОВ.

Как отмечено в работах Боттаччи С., Радаца Л., Колесара П.Ф., Пимпинелла Р., Пепелджугоски П., при инсталляции высокоскоростных многомодовых линий передачи одной из важнейших задач является контроль дифференциальной модовой задержки (ДМЗ), что обусловлено необходимостью отбора пар «лазер-МОВ», для которых обеспечивается требуемое качество передачи для инсталлируемой линии. Такой отбор необходим в первую очередь потому, что имеет место разброс параметров МОВ волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП). Даже для градиентных МОВ последнего поколения характерны локальные флуктуации профиля показателя преломления, которые усиливаются ближе к центральной области сердцевины. Другой особенностью является разброс параметров коммерческих оптических модулей на основе лазеров с вертикальным объемным резонатором (VCSEL - Vertical Cavity Surface Emitting Laser) с рабочей длиной волны, соответствующей первому окну прозрачности  $\lambda=850$  нм, применяемых на высокоскоростных КМ сетях. И, наконец, необходимо учитывать условия согласования лазер-оптическое волокно, зависящие от параметров оптических разъемов, выполненных с определенными допусками. Пропускная способность МОВ ограничивается ДМЗ, которая во многом определяется степенью отклонения профиля показателя преломления от идеального степенного  $\alpha$  - профиля, а также свойствами лазера и условиями ввода оптического излучения в ОВ. Для заданного профиля показателя преломления МОВ параметры ДМЗ могут быть вычислены с приемлемой для практики точностью при различных условиях рассогласования на вводе. Известные методы измерений МОВ базируются на пошаговом сканировании торцов ОВ на входе и выходе линии, измерении отклика на зондирую-

щий сигнал для каждого шага сканирования и последующей обработке результатов. Например, на рабочей длине волны  $\lambda=850$  нм пошаговое сканирование радиального сечения сердцевины тестируемого МОВ на входе выполняется лазерным источником, формирующим поток излучения с диаметром пятна моды 5 мкм. При определении действительного значения эффективной модовой полосы пропускания многомодового ОВ с учетом не только свойств самого тестируемого волокна, но и характеристик лазера, для одного и того же тестируемого волокна данное сканирование поочередно повторяется десять раз в комбинации с каждым из десяти типовых лазеров. Далее в результате анализа полученных профилей выводятся десять значений рассчитанной эффективной модовой полосы пропускания, при этом в паспортные данные многомодового ОВ заносят минимальное значение эффективной модовой полосы пропускания. Многократное выполнение операции пошагового сканирования на входе линии существенно увеличивает стоимость оборудования и время измерений, что, как следствие, увеличивает затраты на выполнение работ по инсталляции многомодовых линий в целом.

Очевидно, что сканирование на вводе можно исключить, если восстановить (реконструировать) профиль показателя преломления МОВ по результатам измерений ДМЗ на выходе линии при фиксированных условиях на вводе. Это требует решения задачи синтеза профиля показателя преломления МОВ по заданной диаграмме ДМЗ (ДДМЗ). При этом достаточно сформировать некий эквивалентный профиль, для которого на заданной длине волны ДДМЗ будет такой же, как для реального профиля при всех допустимых условиях согласования на вводе. Теория оптических волноводов изложена в работах Канценеленбаума Б. З., Семенова Н.А., Черенкова Г.А., Шевченко В.В., Адамса М., Унгера Х-Г., Снайдера А., Лав Дж., Окамото К. и др. К наиболее точным универсальным методам анализа оптических волноводов относятся численные методы – метод конечных разностей, метод конечных элементов и др. При этом для многомодовых ОВ имеет место проблема появления решений, не имеющих физического смысла. В работах Боголюбова А.Н., Делицина А.Л., Нечаева О.В., Кошибы М. рассмотрен метод смешанных конечных элементов (МСКЭ), исключающий решения, не имеющие физического смысла. Однако численные методы требуют значительных вычислительных ресурсов, что существенно ограничивает возможности их применения в процессе инсталляции. Анализ МОВ и их приложения для синтеза профиля показателя преломления волокон рассматривались в работах Снайдера А., Лав Дж., Маркузе Д., Пресби Г. М., Саундерса М. Дж., Бурдина А.В. и ряде др. Однако в них либо были получены решения для частных случаев формы профиля, что ограничивает возможности учета дефектов реальных профилей МОВ, либо универсальные решения, потребовавшие для достижения универсальности снижения быстродействия. Как следствие, известные решения трудно непосредственно применить для построения алгоритма восстановления профиля показателя преломления МОВ, предназначенного для использования в процессе инсталляции

линий. Очевидно, что быстродействие данного алгоритма можно увеличить, если пожертвовать универсальностью применяемого метода анализа МОВ, ограничившись перебором типичных дефектов профилей показателя преломления реальных образцов оптических волокон.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод об актуальности задачи разработки алгоритма восстановления эквивалентного профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон по ДДМЗ при фиксированных условиях ввода и расчета для этого профиля ДДМЗ при произвольных условиях возбуждения.

### **Цель работы и задачи исследования**

Разработка алгоритма восстановления профиля показателя преломления эквивалентного МОВ по ДДМЗ.

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

1. Разработка модели возмущенного ограниченного параболического профиля показателя преломления оптического волокна, учитывающей характерные особенности профилей промышленных образцов многомодовых волокон.
2. Разработка методики вычислений приближенных оценок группового времени запаздывания направляемых мод оптического волокна для заданного градиентного профиля с характерными дефектами и методики расчета ДДМЗ для произвольных условий возбуждения маломодового режима в оптическом волокне.
3. Разработка алгоритма восстановления (реконструкции) профиля показателя преломления оптического волокна.

### **Методы исследования**

При решении поставленных задач использовались методы теории оптических волноводов, методы оптимизации, математический аппарат дифференциального и интегрального исчисления и математическое моделирование.

### **Обоснованность и достоверность результатов работы**

Обоснованность и достоверность результатов работы обеспечиваются корректностью применения используемого аналитического аппарата и подтверждаются результатами физических и вычислительных экспериментов.

### **Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложена модель, описывающая профиль показателя преломления в сердцевине МОВ суммой функции Гаусса и полинома, переменной которого является квадратичная функция, что позволяет учитывать основные особенности профилей промышленных образцов МОВ, определяющие ДДМЗ.
2. Выведены формулы для расчета постоянной распространения произвольной направляемой  $LP_{lm}$  моды для профиля показателя преломления, опи-

сываемого в сердцевине МОВ полиномом, переменной которого является квадратичная функция, и постоянных распространения направляемых  $LP_{lm}$  мод высшего порядка для профиля показателя преломления, описываемого функцией Гаусса.

3. Получены аналитические выражения для расчета ДДМЗ МОВ с возмущенным ограниченным параболическим профилем, описываемым в сердцевине МОВ суммой функции Гаусса и полинома, переменной которого является квадратичная функция.

4. Разработан алгоритм восстановления (реконструкции) эквивалентного профиля показателя преломления по ДДМЗ, измеренной при равномерном возбуждении, вычислительная сложность которого снижена за счет применения аналитических выражений для расчета ДДМЗ МОВ с возмущенным ограниченным параболическим профилем.

#### **Личный вклад**

Основные результаты диссертационной работы, обладающие научной новизной, получены автором самостоятельно и соответствуют пунктам 11, 13 и 14 паспорта специальности 05.12.13.

#### **Практическая ценность результатов работы**

1. Получены количественные оценки параметров профилей показателей преломления ОВ разных поколений, позволившие выделить основные особенности профилей МОВ отечественного и импортного производства, определяющие ДДМЗ.

2. Разработана методика равномерного возбуждения мод в маломодовом режиме МОВ при центрированном вводе оптического излучения через одномодовое оптическое волокно с увеличенным диаметром пятна моды.

3. Показано, что на длине волны, на которой был восстановлен эквивалентный профиль, для условий осевого рассогласования менее 10 мкм и углового рассогласования менее 5 градусов ДДМЗ, рассчитанная по эквивалентному профилю показателя преломления МОВ, восстановленному по ДДМЗ, полученной при равномерном возбуждении, при тех же условиях рассогласования с погрешностью менее 10% согласуется с ДДМЗ реального профиля показателя преломления МОВ.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель, описывающая профиль показателя преломления в сердцевине МОВ суммой функции Гаусса и полинома, переменной которого является квадратичная функция, что позволяет учитывать основные особенности профилей промышленных образцов МОВ, определяющие ДДМЗ.

2. Формулы для расчета постоянной распространения произвольной направляемой  $LP_{lm}$  моды для профиля показателя преломления в сердцевине МОВ, описываемого полиномом, переменной которого является квадратичная

функция, и постоянных распространения направляемых  $LP_{lm}$  мод высшего порядка для профиля показателя преломления, описываемого функцией Гаусса.

3. Алгоритм восстановления (реконструкции) эквивалентного профиля показателя преломления по ДДМЗ, измеренной при равномерном возбуждении, вычислительная сложность которого снижена за счет применения аналитических выражений для расчета ДДМЗ МОВ с возмущенным ограниченным параболическим профилем.

### **Реализация результатов работы**

Основные результаты работы – методика измерения ДДМЗ и алгоритм восстановления профиля показателя преломления МОВ по ДДМЗ внедрены на предприятиях ЦСКБ «Прогресс», ООО НПФ «Стек». Результаты исследований также используются в учебном процессе, что подтверждено актами о внедрении.

### **Апробация результатов работы и публикации**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: VII-X Международных научно-технических конференциях «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2008; Санкт-Петербург, 2009; Миасс, 2010; Самара, 2011); XVI-XVIII Российских научно-технических конференциях проф.-преп. и инженерно-технического состава, научных сотрудников и аспирантов (Самара, 2009-2011); III-IV Российских семинарах по волоконным лазерам (Уфа, 2009; Ульяновск, 2010); VI-XII Международных научно-технических конференциях «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций» (Казань, 2008; Самара, 2009; Уфа, 2010; Казань, 2011).

**Основные результаты** диссертационной работы отражены в 19 научных трудах, включая 7 статей, 4 из которых опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Содержит 132 страницы машинописного текста, 43 рисунка и 5 таблиц. Список литературы включает 142 наименования.

## **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** представлены результаты анализа известных работ, посвященных исследованию профиля показателя преломления оптических волокон. Описаны также известные методы измерения параметров оптических све-

товодов, применяемые на практике. Показано, что в данных работах экспериментальные исследования профилей показателя преломления выполнялись на специализированном оборудовании в лабораторных условиях или непосредственно в процессе отбора МОВ по параметрам широкополосности на заводах, производящих ОВ. Показано, что данные методики нецелесообразно использовать непосредственно при инсталляции новых ВОЛП.

Выполнены измерения профилей показателя преломления МОВ разного поколения. Получены оценки параметров дефектов профиля исследуемых образцов МОВ. Проведенные исследования профилей показателя преломления образцов МОВ выявили характерные отличия их от идеального степенного  $\alpha$  - профиля. Это – провал или пик по оси волокна и отклонение формы профиля от параболы в средней зоне. На рис. 1 и 2 представлены данные результатов измерений профилей градиентных МОВ разных поколений.

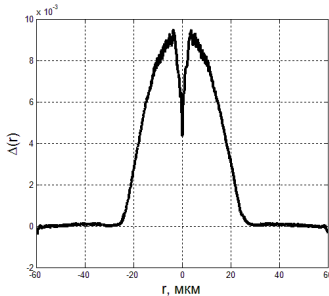


Рис.1. Пример профиля показателя преломления МОВ категории ОМ2.

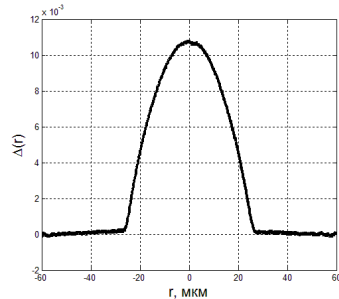


Рис.2. Пример профиля показателя преломления МОВ категории ОМ3.

Применяемые на инфокоммуникационных сетях МОВ должны иметь градиентный профиль близкий к идеальному степенному  $\alpha$  - профилю. Проведенные измерения подтвердили, что профиль показателя преломления оптических волокон в той или иной мере является приближением к параболическому. Естественно предположить, что для описания эквивалентного профиля, учитывающего отличия профилей МОВ от идеального степенного  $\alpha$  - профиля и близкого к нему по форме, может быть использована модель, для которой существуют приближенные аналитические решения. Рассмотрена модель возмущенного ограниченного параболического профиля показателя преломления оптического волокна, учитывающая характерные дефекты профилей промышленных образцов многомодовых волокон. Предложено в центральной области МОВ описывать профиль суммой функции Гаусса и полинома, переменной которого является квадратичная функция, а на периферии - константой:

$$n^2(R) = \begin{cases} n_p^2 + n_{GA}^2(R) - n_{PA}^2(R) & , 0 \leq R \leq 1 \\ n_c^2 & , 1 \leq R \leq \infty \end{cases} \quad (1)$$



$$n_{GA}^2(R) = n_g^2 - n_p^2 \cdot \exp -R^2 / R_g^2 ,$$

$$n_{PA}^2(R) = n_p^2 - n_c^2 \cdot \sum_{i=1}^N q_i \cdot R^{2i} ,$$

где  $n_c$  - показатель преломления оболочки ОВ;  $R_g$  - безразмерный параметр;  $R=r/a$  - нормированный радиус;  $r$  - координата;  $a$  - радиус сердцевины волоконного световода.

**Вторая глава** посвящена выводу аналитических выражений для расчета оценок группового времени запаздывания направляемых мод МОВ с возмущенным ограниченным параболическим профилем показателя преломления.

Поскольку профили показателя преломления образцов промышленных МОВ являются в некоторой степени приближением к идеальному степенному  $\alpha$  - профилю, логично было воспользоваться введенным в работах А.Снайдера и Дж.Лава методом приближения Гаусса, в основе которого лежит замена некоторого произвольного профиля показателя преломления коаксиального ОВ эквивалентным идеальным неограниченным параболическим профилем. Данный метод исключает решения, не имеющие физического смысла, и позволяет получить аналитические формулы для вычислений постоянных распространения направляемых мод МОВ для некоторых описывающих профили функций. В работах Бурдина В.А. и Бурдина А.В. метод приближения Гаусса был обобщен на случай произвольного профиля коаксиального ОВ.

В настоящей работе для повышения быстродействия алгоритма было решено пожертвовать универсальностью и использовать решения для МОВ с возмущенным ограниченным параболическим профилем показателя преломления в аналитической форме. Для этого на основе метода приближения Гаусса получены аналитические выражения для расчета постоянных распространения направляемых мод  $LP_{lm}$  высшего порядка для профиля показателя преломления, описываемого функцией Гаусса:

$$C - a^2 k^2 \Delta n(k)^2 R_0^2 \rho \cdot G_n^{l,l+1} \quad 0, b = 0 ; \quad (2)$$

$$\beta^2 = k^2 n(k)_C^2 + \frac{k^2 \Delta n(k)^2 R_g^2 G_n^{l,l}}{a^2 R_0^2} ; \quad (3)$$

$$\beta_{lm}^2 = \partial \beta_c^2 + \partial \beta_\Delta^2 \frac{R_g^2 G_n^{l,l}}{m+l-1 ! / m-1 !} \quad 0, b \quad (4)$$

Здесь:  $R_g$  - безразмерный параметр;

$R_0 = r_0 / a$  - нормированный радиус пятна моды;

$\rho = R_0^2 / R_G^2$ ;  $b = 1 + \rho$ ;  $\Delta n(k)^2 = n(k)_0^2 - n(k)_C^2$ ;

$$\partial\beta_c^2 = \frac{\partial[k^2 n(k)_c^2]}{\partial k}; \partial\beta_\Delta^2 = \frac{\partial[k^2 \Delta n(k)^2]}{\partial k};$$

Константа для заданного порядка моды  $l, m$ :

$$C = m \frac{m+l-1!}{m-1!} + m+l-1 \frac{m+l-2!}{m-2!} + 2l^2 \sum_{i=0}^{m-2} \frac{i+l-1!}{i!};$$

Функция  $G_n^{l,\mu}$   $x, b$  определяется как:

$$G_n^{l,\mu} x, b = \exp(-bx) \cdot \sum_{q=0}^{2n} g_q^l \cdot \left[ \frac{x^{q+\mu}}{b} + \sum_{k=1}^{q+\mu} \frac{q+\mu!}{q+\mu-k!} \cdot \frac{x^{q+\mu-k}}{b^{k+1}} \right]. \quad (5)$$

На рис.3 представлены результаты вычислений спектральных характеристик отдельных мод для примера Гауссова профиля показателя преломления ОВ в увеличенном масштабе для длин волн в области 1,3 мкм. На рис.4 представлены рассчитанные зависимости, характеризующие относительное расхождение результатов расчетов по полученным формулам с оценками, полученным численным методом – МСКЭ.

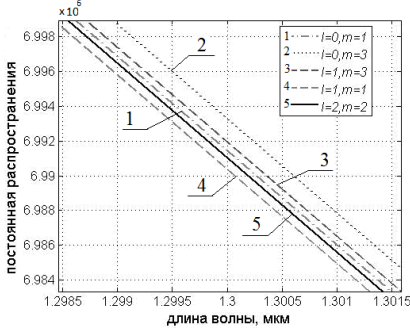


Рис. 3 Спектральные зависимости постоянной распространения отдельных мод ОВ с Гауссовым профилем показателя преломления

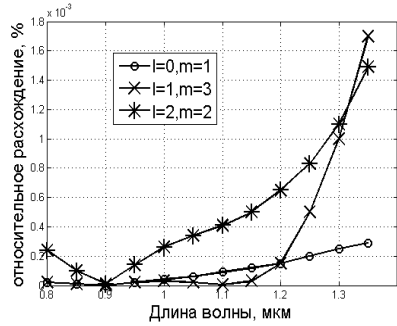


Рис. 4. Относительное расхождение оценок постоянных распространения мод, вычисленных по формулам (2)-(4) и МСКЭ для ОВ с Гауссовым профилем показателя преломления

Аналитические выражения для расчета постоянных распространения направляемых мод  $LP_m$  высшего порядка для профиля показателя преломления, описываемого четной степенной функцией:

$$a^2 k^2 \Delta n^2 R_0^{4i} \left[ G_n^{l,l+1} 0,1 - G_n^{l,l+1} (R_0^{-2i}, 1) \right] - C = 0 \quad (6)$$

$$\beta_{lm}^2 = k^2 n_0^2 - \frac{m-1!}{m+l-1!} \cdot \left\{ \frac{C}{a^2 R_0^{2i}} + k^2 \Delta n^2 R_0^{2i} \left[ G_n^{l,l+1} 0,1 - G_n^{l,l+1} (R_0^{-2i}, 1) \right] \right\} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \beta_{lm}^2}{\partial k} = k^2 n_0^2 - \frac{R_0^{2i} \frac{\partial [k^2 \Delta n^2]}{\partial k} \left[ G_n^{l,l+i} \quad 0,1 - G_n^{l,l+i} (R_0^{-2i}, 1) \right]}{m+l-1 \quad ! \quad m-1 \quad !} \quad (8)$$

На рис. 5 представлены спектральные зависимости постоянных распространения отдельных мод для примера ограниченного параболического профиля показателя преломления ОВ в области длины волны 1,3 мкм. На рис.6 представлены оценки относительного расхождения результатов расчетов по полученным формулам с результатами, полученными МСКЭ.

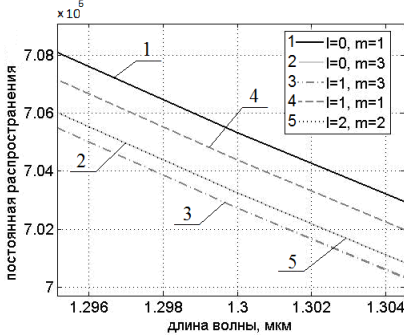


Рис. 5 Спектральные зависимости постоянной распространения отдельных мод ОВ с ограниченным параболическим профилем

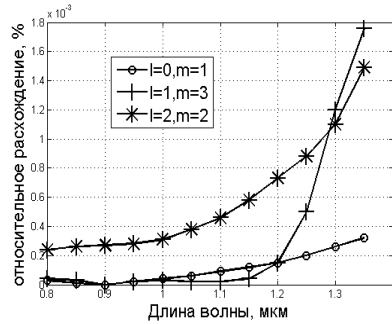


Рис. 6. Относительное расхождение оценок постоянных распространения мод, вычисленных по формулам (6)-(8) и МСКЭ для примера ограниченного параболического профиля

Проведено сравнение спектральных зависимостей постоянных распространения отдельных мод, вычисленные по полученным формулам с оценками, полученными численным методом (МСКЭ) для частных примеров профиля показателя преломления ОВ: Гауссова и ограниченного возмущенного параболического. Показано, что расхождение не превышает 0,02%.

В итоге методом приближения Гаусса были получены уравнение эквивалентного пятна моды и выражения для постоянной распространения и ее первой производной в аналитическом виде для профиля показателя преломления, описываемого в сердцевине МОВ суммой функции Гаусса и полинома, переменной которого является квадратичная функция (1). Они имеют вид:

$$C_{PA} - C_{GA} - C = 0, \quad (9)$$

где  $C_{PA} = a^2 k^2 n_p^2 - n_c^2 R_0^2 \cdot S$ ;

$$S = \sum_{i=1}^N \left[ G_n^{l,l+i} \quad 0,1 - G_n^{l,l+i} (R_0^{-2i}, 1) \right] \cdot R_0^{2i} \cdot q_i$$

$$C_{GA} = a^2 k^2 n_g^2 - n_p^2 R_0^2 \rho \cdot \Delta_{GA}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_{GA} &= \left[ G_n^{l,l+1} \quad 0, b \quad -G_n^{l,l+1} \quad R_0^{-2}, b \right] \\
\beta_{lm}^2 &= k^2 n_p^2 - \frac{m-1!}{m+l-1!} \left\{ \frac{C}{a^2 R_0^2} + \frac{C_{PA}}{R_0^2} - \frac{C_{GA} \cdot \Delta_{GB}}{\rho^2 \cdot \Delta_{GA}} \right\}, \\
\frac{\partial \beta_{lm}^2}{\partial k} &= k^2 n_p^2 - \frac{m-1! C_{PA}}{m+l-1!} \cdot \frac{\partial \left[ k^2 n_p^2 - n_c^2 \right] / \partial k}{R_0^2 k^2 n_p^2 - n_c^2} + \\
&+ \frac{m-1! C_{GA}}{m+l-1!} \frac{\partial \left[ k^2 n_g^2 - n_p^2 \right] / \partial k}{\rho^2 \Delta_{GA}} - \frac{m-1! C}{m+l-1! a^2 R_0^2} \\
\Delta_{GB} &= \left[ G_n^{(l,l)}(0, b) - G_n^{(l,l)}(R_0^{-2}, b) \right]
\end{aligned} \tag{10}$$

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию условий возбуждения МОВ в маломодовом режиме. Для этой цели были использованы модели, описанные в работах Пепелдзугоски П., Агравала Г., Патела К.М. Представлено описание распределения мощности моды в поле лазера в оптическом волокне для определения коэффициентов связи мод на стыке лазер-МОВ. Для анализа условий ввода использовалось известное решение для оценки коэффициентов связи мод на стыке ОВ.

Для измерения и контроля параметров МОВ необходимо исключить или, по крайней мере, уменьшить влияние неопределенности ввода. Один из возможных способов – равномерное возбуждение мод в световоде. Для этого, как правило, используют смещенный ввод, что ведет к значительным потерям мощности на вводе. Предложено для равномерного возбуждения мод в МОВ использовать включение между источником когерентного оптического излучения и МОВ отрезка одномодового ОВ с увеличенной площадью эффективного сечения. Выполнен расчет коэффициентов связи мод при различных вариантах ввода основной моды с выхода лазера в МОВ при осевом рассогласовании и через одномодовое оптическое волокно с увеличенной площадью эффективного сечения. Показано, что даже относительно небольшое увеличение площади эффективного сечения одномодового ОВ существенно увеличивает устойчивость распределения мощности оптического излучения между модами МОВ к рассогласованиям. Полученные результаты исследования позволяют судить о приемлемости предложенного метода равномерного ввода оптического излучения с выхода лазерного источника в МОВ при измерении импульсной характеристики. Описана методика измерения ДДМЗ МОВ инсталлированной линии передачи.

**Четвертая глава** посвящена разработке алгоритма восстановления эквивалентного профиля показателя преломления МОВ по ДДМЗ.

Согласно (1) искомыми параметрами эквивалентного профиля являются  $a, n_p, n_g, n_c, R_g, q_i, N$ . Как показал анализ, приемлемая погрешность оценок ДМЗ достигается при аппроксимации профиля МОВ эквивалентным уже при  $N=4$ . В этом случае число неизвестных не превышает восьми, что позволило воспользоваться методом оптимизации Нелдера-Мида, для поиска минимума целевой функции, заданной выражением:

$$F = \sum_{j=1}^{m-l} \left[ \Delta t_{lm}^{\text{Re}} - \Delta t_{lm}^{\text{Eq}} \right]^2 / \Delta \bar{t}_{lm}^{\text{Re}}, \quad (11)$$

где  $\Delta t_{lm}^{\text{Re}}$  - модовая задержка реального МОВ;  $\Delta t_{lm}^{\text{Eq}}$  - модовая задержка эквивалентного МОВ.

В процессе оптимизации ДДМЗ эквивалентного возмущенного профиля вида (1) вычислялись по формулам (9, 10). Соответственно, предварительно решалось уравнение (9) относительно эквивалентного радиуса пятна моды, а затем подставлялось его значение в (10) и вычислялись постоянная распространения моды с индексами  $l$  и  $m$  и ее первая производная, которая и определяет время распространения моды в волокне. Вычисления выполнялись для всех направляемых мод в МОВ. Затем для заданной длины линии рассчитывались оценки временных задержек мод относительно друг друга, по которым и строили ДДМЗ. В качестве начального приближения брался ограниченный параболический профиль.

Для проверки работоспособности предложенного алгоритма был выполнен вычислительный эксперимент, на первом шаге которого с помощью МСКЭ рассчитаны спектральные зависимости постоянных распространения направляющих мод для полученных в результате измерений и заданных таблично профилей показателя преломления образцов МОВ. На втором шаге по спектральным зависимостям численными методами вычислялись первые производные постоянных распространения мод по длине волны, по которым оценивалось время распространения мод на заданной длине МОВ на заданной длине волны и строилось ДДМЗ для условий равномерного возбуждения мод на вводе. Затем по данной ДДМЗ, используя предложенный алгоритм, восстанавливался эквивалентный ограниченный возмущенный параболический профиль показателя преломления МОВ. На рис.7. представлен оригинальный профиль образца МОВ и восстановленный для него по ДДМЗ эквивалентный профиль показателя преломления. Для исходного измеренного профиля МОВ повторялись вычисления ДДМЗ с помощью МСКЭ для центрированного ввода, для ввода с осевым и угловым рассогласованиями. И, наконец, рассчитывались ДДМЗ предложенным методом для эквивалентного профиля по формулам (9), (10) для тех же значений рассогласования на вводе. Примеры результатов вычислений ДДМЗ на основе МСКЭ и предложенного приближения для одного из профилей на длине волны 1300 нм приведены на рис.8-10.

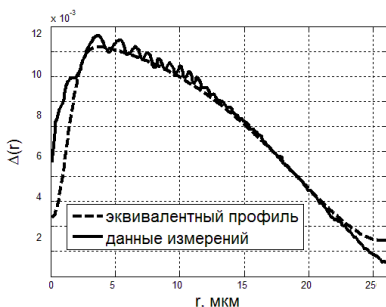


Рис.7. Оригинальный профиль образца МОВ и восстановленный для него по ДДМЗ эквивалентный профиль показателя преломления

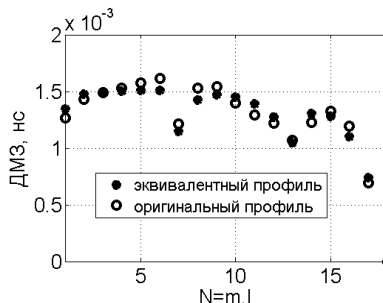


Рис.8. ДДМЗ при центрированном вводе оптического излучения в ОБ на длине волны 1300 нм ( $LP_{01} - LP_{06}$  для  $N=1-6$ ;  $LP_{11} - LP_{16}$  для  $N=7-12$ ;  $LP_{21} - LP_{26}$  для  $N=13-18$ )

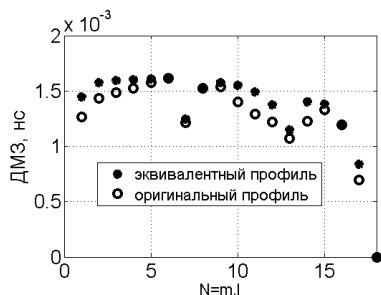


Рис.9. ДДМЗ при осевом рассогласовании 5 мкм на длине волны 1300 нм ( $LP_{01} - LP_{06}$  для  $N=1-6$ ;  $LP_{11} - LP_{16}$  для  $N=7-12$ ;  $LP_{21} - LP_{26}$  для  $N=13-18$ )

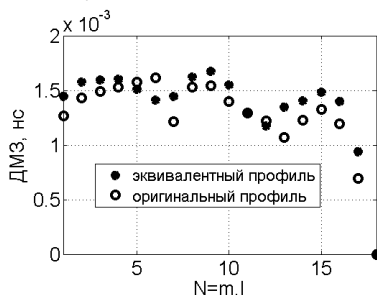


Рис.10. ДДМЗ при угловом рассогласовании  $3^0$  на длине волны 1300 нм ( $LP_{01} - LP_{06}$  для  $N=1-6$ ;  $LP_{11} - LP_{16}$  для  $N=7-12$ ;  $LP_{21} - LP_{26}$  для  $N=13-18$ )

В целом результаты вычислений ДДМЗ для реального и эквивалентного профилей достаточно хорошо согласуются во всем допустимом диапазоне изменений допусков на рассогласование на вводе, что позволяет рекомендовать разработанный алгоритм восстановления эквивалентного профиля показателя преломления МОВ по ДДМЗ для реализации измерений ДМЗ при инсталляции линий передачи.

**В заключении** перечислены основные научные и практические результаты работы:

1. Разработана математическая модель, описывающая профиль показателя преломления в сердцевине МОВ суммой функции Гаусса и полинома, переменной которого является квадратичная функция, что позволяет учиты-

вать основные особенности профилей промышленных образцов МОВ, определяющие ДДМЗ.

2. Получены аналитические выражения для расчета приближенных оценок группового времени запаздывания направляемых мод МОВ для заданного градиентного профиля с характерными дефектами.

3. Разработан алгоритм восстановления (реконструкции) эквивалентного профиля показателя преломления по ДДМЗ, измеренной при равномерном возбуждении, вычислительная сложность которого снижена за счет применения аналитических выражений для расчета ДДМЗ МОВ с возмущенным ограниченным параболическим профилем.

**В приложениях** приведены документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

#### ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Бурдин, А.В. Исследование дефектов профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон кабелей связи / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // Инфокоммуникационные технологии. - 2010. - Т.8, №2, – С.22-27.
2. Бурдин, А. В. Влияние флуктуаций диаметра сердцевины многомодовых оптических волокон на передачу сигналов в маломодовом режиме / А.В. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов, В.С. Макаров, К.А. Яблочкин // Инфокоммуникационные технологии. - 2010. - Т.8, №3, – С.12-21.
3. Бурдин, А.В. Приближенные аналитические решения  $LP_{lm}$  мод для частных примеров профиля показателя преломления оптического волокна / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, О.Р. Дельмухаметов, К.А. Яблочкин // Инфокоммуникационные технологии. - 2011. - №9, С.25-33.
4. Бурдин, А. В. Восстановление эквивалентного профиля показателя преломления оптического волокна по диаграмме дифференциальной модовой задержки / А. В. Бурдин, В.А. Бурдин, К.А. Яблочкин // Инфокоммуникационные технологии. - 2011. - Т.9, №3, С.28-33.
5. Яблочкин, К.А. Моделирование ввода излучения лазера в многомодовое волокно при использовании одномодовых ОВ с увеличенной площадью эффективного сечения /К.А. Яблочкин // Обзорение прикладной и промышленной математики. - 2010. - Т.17, №6, С.959.
6. Bourdine, A.V. Results of conventional field-test equipment application for identification of multimode optical fibers with high DMD / A.V. Bourdine, E.V. Dmitriev, D.E. Praporschchikov, V.A. Prokopyev, K.A. Yablochkin // Proceedings of SPIE vol. 7374, 2009. – pp. 73740J-1 - 73740J-08
7. Bourdine, A.V. Investigation of defects of refractive index profile of silica graded-index multimode fibers / A.V. Bourdine; D.E. Praporschchikov; K.A. Yablochkin // Proceedings of SPIE vol. 7992, 2010. – pp. 799206-1 - 799206-6
8. Burdin, V.A. // Mode excitation by laser source in multimode optical fiber under special single-mode optical fiber use / V.A. Burdin, A.V. Bourdine, K.A. Yablochkin // Proceedings of SPIE vol. 7992, 2010. – pp.799207-1 – 799207-6.
9. Бурдин А.В., Яблочкин К.А // Результаты исследований искажений оптических сигналов в многомодовых ВОЛП / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докладов VII Международная научно-техническая конференция, г.Самара, - 2008., с.273-274
10. Бурдин, А.В. Результаты измерений дифференциальной модовой задержки многомодовых волокон разного поколения / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // Физика и технические

- приложения волновых процессов: тез. докладов VII Международная научно-техническая конференция, г. Самара, - 2008, с.298-299.
11. Бурдин, А.В. Результаты апробации способа согласования одномодового источника излучения с многомодовым оптическим волокном на основе соосного ввода / А.В. Бурдин, В.И. Прокопьев, К.А. Яблочкин // III Российский семинар по волоконным лазерам: тез. докладов, г. Уфа, - 2009, с.100-102.
  12. Яблочкин К.А. // Сканирование поляризационных характеристик обратного рассеяния многомодовых оптических волокон // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докладов VIII Международная научно-техническая конференция, г. Санкт-Петербург, - 2009, с.231
  13. Дашков, М.В. // Реконструкция профиля показателя преломления ОВ по результатам измерений на основе метода ближнего поля / А.В. Бурдин, Д.Е. Прапорщиков, К.А. Яблочкин // Физика и технические приложения волновых процессов: тез. докладов VIII Международная научно-техническая конференция, г. Санкт-Петербург, - 2009., с.233
  14. Бурдин А.В. Результаты оценки параметров хроматической дисперсии высших мод кварцевых многомодовых оптических волокон разных поколений / А.В. Бурдин, Е.В. Дмитриев, Д.Е. Прапорщиков, К.А. Яблочкин // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: тез. докладов X Международная научно-техническая конференция, г. Самара, - 2009, с.374-375
  15. Бурдин, А.В. Совместное применение когерентных источников излучения и кварцевых градиентных волокон / А.В. Бурдин, К.А. Яблочкин // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: тез. докладов X Международная научно-техническая конференция, г. Самара, - 2009, с.376-378
  16. Яблочкин К.А. // Результаты согласования когерентного источника излучения и многомодовых оптических световодов // Оптика – 2009: тез. докладов VI Международная конференция молодых ученых и специалистов, г. Санкт-Петербург, - 2009, с. 334-336
  17. Бурдин, А.В. Применение одномодовых волокон с увеличенной площадью эффективного сечения для ввода излучения лазера в многомодовое волокно / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, К.А. Яблочкин // IV Российский семинар по волоконным лазерам: тез. докладов, г. Ульяновск, - 2010, с.86-87
  18. Бурдин, А.В. // Приближенные аналитические решения для частных примеров профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, К.А. Яблочкин // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: тез. докладов XII Международная научно-техническая конференция, г.Казань, - 2011, с.304-305.
  19. Бурдин, А.В. // Синтез эквивалентного профиля показателя преломления многомодовых оптических волокон по диаграмме дифференциальной модовой задержки / А.В. Бурдин, В.А. Бурдин, К.А. Яблочкин // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций: тез. докладов XII Международная научно-техническая конференция, г.Казань, - 2011, с.306-307.