

На правах рукописи



Чапало Иван Евгеньевич

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МНОГОМОДОВЫХ
ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МОДОВЫМ
СОСТАВОМ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Радиофизика» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель – **Медведев Андрей Викторович**,
кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры «Радиофизика» ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты: **Бисярин Михаил Александрович**,
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник кафедры радиофизики ФГБОУ
ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет»

Стригалева Владимир Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук, профессор
кафедры световодной фотоники ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет информационных
технологий, механики и оптики»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе» Российской академии наук, г.
Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится “06” июня 2017 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте университета eltech.ru.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет Д.212.238.08

Автореферат разослан “31” марта 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.238.08,
Кандидат технических наук, доцент

 Смирнов Е.А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последнее десятилетие волоконно-оптические датчики (ВОД) стремительно переходят от стадии лабораторных прототипов к состоянию практических измерительных систем. Это развитие обусловлено такими их преимуществами, как высокая чувствительность, электромагнитная невосприимчивость, взрыво- и пожаробезопасность и др. Одним из типов распределенных ВОД является межмодовый волоконный интерферометр (МВИ), принцип действия которого заключается в использовании эффекта дифференциальной фазовой модуляции (ДФМ) направляемых мод и анализе картины их интерференции, так называемой спекл-картины, формирующейся на выходе многомодового волоконного световода (МВС) [1, 2]. Особенность ДФМ заключается в том, что к преобразованиям спекл-картины приводят только изменения разностей фаз мод, одинаковые же фазовые приращения мод на спекл-картину влияния не оказывают. Тематике МВИ и ДФМ посвящено достаточно большое количество работ, в том числе и в настоящее время, например, [3, 4]. МВИ выгодно отличается от других типов распределенных ВОД простотой и относительно низкой стоимостью. Однако область применения МВИ сильно ограничена в связи с наличием ряда недостатков: нелинейностью передаточной характеристики, наличием фединга и отсутствием зависимости сигналов ДФМ от координаты внешнего воздействия на волокно. Первые два недостатка в значительной мере устраняются применением многоэлементного фото приемника или ПЗС камеры [5, 6]. Устранение третьего недостатка дает возможность решить отдельную важную проблему – задачу локализации внешнего воздействия.

В литературе практически отсутствуют варианты решений задачи локализации в МВИ. Среди предложенных методов можно отметить устройства с переходом в импульсный режим работы [7], технологии которых являются весьма дорогостоящими, а также системы с увеличением числа отдельных МВС для увеличения количества разрешимых зон, что является довольно громоздким и по сути представляет собой использование нескольких отдельных МВИ [8]. Решение задачи локализации в МВИ требует рассмотрения интерференционных эффектов в МВС, причем с таким режимом распространения света, при котором проявлялась бы зависимость каких-либо характеристик сигналов МВИ от координаты воздействия.

В диссертации исследуются интерференционные эффекты в МВС с непрерывным режимом его возбуждения и переменным модовым составом вдоль продольной координаты с целью использования их для определения места внешнего воздействия на МВС.

Следует подчеркнуть, что при работе МВИ в условиях дифференциальной фазовой модуляции и с изменяющимся вдоль МВС модовым составом возникает необходимость детального изучения процессов распространения и

взаимодействия мод с учетом как амплитудных, так и фазовых преобразований. На сегодняшний день существует большое число публикаций по связи мод на неоднородностях световода, включая исследования последних лет [9]. Однако, подавляющее число работ не рассматривает фазовые преобразования мод в многомодовых световодах. Так, например, в хорошо известной диффузионной модели многомодового нерегулярного световода [10] используется система уравнений для связанных *мощностей* и не затрагиваются вопросы изменения фаз мод. В работе [11] делается попытка разработать теорию многомодовых волокон, учитывающую фазовые преобразования мод, однако, полученная в ней функция передачи МВС в непосредственном виде не пригодна для анализа процессов в МВИ и требует серьезной переработки. Учитывая отмеченное положение, в данной работе серьезное внимание уделено фазовым модовым преобразованиям как динамического, так и статического характера.

Помимо решения задачи локализации в МВИ, актуальной является задача исследования зависимости сигналов МВИ от параметров МВС при частотной модуляции лазерного источника. Этот вопрос важен как в контексте датчиков физических величин (повышение отношения сигнал/шум), так и в многомодовых линиях связи при рассмотрении модовых шумов, возникающих вследствие спектральных флуктуаций VCSEL-лазеров [12]. Изменения частоты лазера являются одной из причин возникновения сигналов ДФМ. Этот эффект изучался в рамках исследования корреляционных характеристик выходной спекл-картины МВИ, а также частотных свойств модовых шумов [13]. Однако ряд вопросов, таких как зависимость характеристик сигналов МВИ (их амплитуды и спектра) от изменения частоты лазера и профиля показателя преломления сердцевинны световода, были рассмотрены недостаточно подробно.

В связи с выше изложенным, комплексное исследование интерференционных эффектов в МВС, в том числе с изменяющимся модовым составом, с целью раскрытия физических механизмов модовых преобразований, выявления свойств ДФМ сигналов при изменении количества распространяющихся мод вдоль МВС представляется *актуальным*.

Целью работы является улучшение измерительных характеристик распределенного межмодового волоконного интерферометра с учетом особенностей интерференционных эффектов в МВС с переменным модовым составом и разработка методов, позволяющих локализовать место внешнего воздействия при непрерывном режиме возбуждения МВС.

Для достижения данной цели необходимо решить **следующие основные задачи**:

1. Исследовать особенности сигналов МВИ в зависимости от параметров МВС и режима его возбуждения и рассмотреть возможность создания

эффективного аппарата анализа измерительных характеристик МВИ (амплитудных, спектральных, передаточных);

2. Исследовать интерференционные сигналы МВИ с частотной модуляцией лазерного источника и рассмотреть возможность оценки полосы пропускания многомодового световода в непрерывном режиме возбуждения и повышения отношения сигнал/шум в распределенном МВИ;

3. Разработать методики создания МВИ с переменным модовым составом и способы измерения его основных характеристик, а также изучить особенности сигналов в данном режиме работы;

4. Изучить возможность локализации внешних воздействий на распределенный МВИ с переменным модовым составом в режиме непрерывного оптического возбуждения и в широком диапазоне величин возмущения.

Научная новизна диссертации состоит в том, что в ней **впервые**:

1. Разработан метод усредненных нормированных амплитудных и спектральных характеристик, позволяющий корректно учитывать влияние многих параметров МВИ при выполнении анализа и модельных расчетов распределенных измерительных устройств на основе МВИ;

2. Выполнены модельные расчеты, демонстрирующие возможность оценки реальной полосы пропускания МВС, используя модуляцию оптической частоты лазера, работающего в непрерывном режиме. Теоретические выводы подтверждены экспериментально;

3. Детально изучен МВИ с изменяющимся модовым составом вдоль МВС. Установлено, что характеристики сигналов МВИ существенно зависят от распределения мощности по модам в месте волоконного тракта, подверженного внешнему воздействию;

4. Разработаны принципы локализации места воздействия на МВС с использованием усредненных и нормированных амплитудных и спектральных характеристик в МВИ, работающем в режиме с непрерывным возбуждением и изменяющимся модовым составом вдоль МВС;

5. Разработаны и реализованы схемы МВИ с изменяющимся модовым составом вдоль МВС, с однонаправленным и двунаправленным световыми потоками, позволяющие реализовать измерительное устройство с возможностью локализации внешнего воздействия независимо от параметров воздействия. Выполнены эксперименты, подтверждающие возможность локализации внешнего воздействия в распределенном МВИ с изменяющимся вдоль МВС модовым составом;

6. Выполнены оценки разрешающей способности распределенного МВИ с переменным модовым составом, показывающие, что число разрешимых пространственных зон локализованных внешних воздействий определяется

отношением сигнал/шум и может превышать число распространяющихся по МВС модовых групп.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, позволили сформулировать следующие **научные положения, выносимые на защиту:**

1. Применение метода нормированных усредненных амплитудных и спектральных характеристик межмодового волоконного 11 интерферометра позволяет расширить диапазон измерения внешних воздействий;

2. Использование нормированных усредненных амплитудных и передаточных характеристик межмодового волоконного интерферометра при модуляции частоты излучения лазерного источника позволяет измерить полосу пропускания многомодового волоконного световода без применения высокочастотных оптоэлектронных передающих и приемных устройств;

3. Амплитудный отклик многомодового волоконного световода на паразитную частотную модуляцию лазера может быть существенно снижен (на 2-3 порядка) при использовании световода с оптимальным профилем показателя преломления (с минимальной модовой дисперсией);

4. Амплитудный и спектральный отклик на выходе межмодового волоконного интерферометра определяется модовым составом и параметрами световода в месте внешнего возмущения;

5. Межмодовый волоконный интерферометр с переменным модовым составом позволяет определить место внешнего воздействия на чувствительный волоконный световод в режиме непрерывного когерентного возбуждения;

6. Пространственное разрешение межмодового волоконного интерферометра с переменным модовым составом зависит от отношения сигнал/шум и может превышать максимальное число распространяющихся модовых групп.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в том, что результаты работы могут быть непосредственно применены при разработке и построении волоконно-оптических распределенных датчиков физических величин, использующих межмодовые волоконные интерферометры в режиме непрерывного возбуждения. Разработанные физико-математические модели и результаты теоретических расчетов МВИ с переменным модовым составом могут быть использованы для улучшения измерительных параметров распределенных сенсорных систем на основе МВИ, а также для оценки их характеристик. Кроме того, теоретический анализ модовых преобразований, проведенный с учетом фаз мод в МВС с увеличением количества распространяющихся мод вдоль продольной координаты, несет в себе самостоятельную научную ценность, привносящую большее понимание распространения света и интерференционных эффектов в МВС с переменным

модовым составом. Обоснованные в работе рекомендации по оптимальному выбору многомодовых световодов с низким уровнем модовых шумов, вызванных частотными флуктуациями лазера, могут быть использованы для улучшения параметров многомодовых линий связи и датчиков физических величин. При этом выигрыш в отношении сигнал/шум многомодовой оптической системы может достигать 2-3 порядков.

Публикации и апробация работы. По материалам диссертации опубликовано 17 работ, из них 4 в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 2 – в изданиях, входящих в международные системы цитирования SCOPUS и Web of Science, 11 – в материалах конференций и научных журналах.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: SPIE Optics and Photonics (Interferometry XVII: Techniques and Analysis), Сан-Диего, США, 2014 г., SPIE Photonics Europe (Optical Sensing and Detection), Брюссель, Бельгия, 2016, а также на Всероссийских и региональных конференциях: «Лазеры. Измерения. Информация - 2013» (Санкт-Петербург, 2013 г.), «XL Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2011 г.), «XLI Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-Петербург, 2012 г.), «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2015 г.), «Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков» (Санкт-Петербург, 2015 г.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 203 наименования. Объем работы составляет 199 страниц, включая 118 рисунков.

Краткое содержание работы

Во **введении** раскрыта актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава, содержащая обзор литературы, состоит из двух параграфов. В первом параграфе дан обзор типов датчиков и устройств, в которых так или иначе используются или оказывают влияние на их работу явления преобразования и взаимодействия мод, а также их интерференция. Данная работа посвящена исследованию межмодового волоконного интерферометра (МВИ) (рис. 1): МВС возбуждается когерентным источником, а после прохождения света по волокну, на выходном торце МВС формируется пятнистая картина в результате интерференции распространяющихся мод (спекл-картина). При внешнем возмущении МВС или при модуляции оптической частоты лазера происходит изменение разностей фаз отдельных мод, в результате чего интерференционные «пятна» спекл-картины начинают

перемещаться, что при наличии пространственной фильтрации регистрирует фотоприемник.

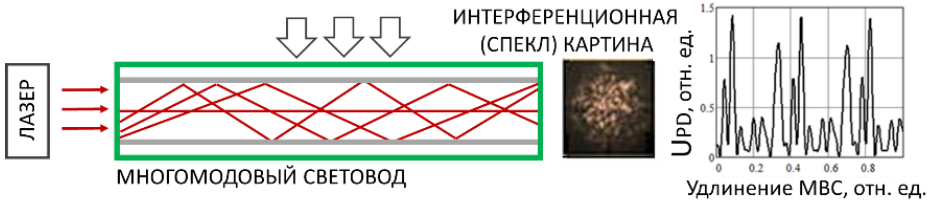


Рис. 1 Принцип работы межмодового волоконного интерферометра.

В параграфе также дан обзор применений датчиков на основе МВИ и обзор методов локализации внешнего воздействия на чувствительный элемент. В частности, сделан вывод, что эффективных методов локализации внешнего воздействия на распределенный МВИ без применения импульсного режима работы источника в литературе не представлено.

Во втором параграфе раскрыты основные физические вопросы теории распространения электромагнитных волн оптического диапазона в МВС, межмодовой интерференции, фединга ДФМ-сигнала, взаимодействия мод, модового шума, контроля и оценки модового состава.

В заключении первой главы на основании обзора сформулированы цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена вопросам анализа интерференционных сигналов на выходе МВС. В параграфе 2.1 изложено введение в проблематику, рассмотрены основные механизмы, приводящие к ДФМ, выделены наименее изученные особенности и характеристики ДФМ-сигналов, такие как: сигнальный отклик МВИ на модуляцию оптической длины и на частотную модуляцию лазерного источника; влияние числа распространяющихся мод и профиля показателя преломления на характеристики МВИ; отношение сигнал/шум; возможность локализации внешнего воздействия в распределенном МВИ при непрерывном когерентном возбуждении.

В параграфе 2.2 рассматривается отклик сигнала МВИ на модуляцию оптической длины МВС или амплитудная характеристика МВИ (АХ). В известных работах в качестве АХ МВИ рассматривается зависимость амплитуды выходного сигнала от величины внешнего воздействия. Однако в каждом конкретном случае эта зависимость непредсказуема (подвержена федингу), поскольку является функцией многих случайных параметров, таких как амплитуды и фазы мод, количество возбужденных мод, флуктуации частоты лазера, условия возбуждения МВС и т.д. В этой связи такая АХ является очень сложно анализируемой. Для решения этой проблемы в диссертации предложен подход, заключающийся в использовании усредненной нормированной амплитудной характеристики, дающий широкие

возможности анализа сигналов МВИ. Если применить процедуры усреднения по координатам регистрируемой части спекл-картины, а также по ансамблю измерений, то можно получить некоторую усредненную АХ, на которую уже не оказывают влияние случайные параметры. Таким образом, в данной работе амплитудная характеристика МВИ – это зависимость усредненной нормированной амплитуды изменения сигнала МВИ (нормированное СКО сигнала) от амплитуды изменения оптической длины волокна δL :

$$AX(\delta L) = \sqrt{\frac{(I(L + \delta L) - I(L))^2}{I(L)^2}}$$

В работе получено аналитическое выражение для АХ с использованием интегральных функций, подобных интегралам Френеля, позволяющее анализировать ее зависимость от различных параметров МВС, а также его условий возбуждения:

$$AX(\delta L, M, \alpha) = \sqrt{1 - \left| M \frac{\alpha + 2}{2\alpha} \frac{1}{y(\delta L, M)^{\frac{\alpha+2}{2\alpha}}} \int_{Y(\delta L)}^{Y(\delta L) + y(\delta L, M)} \frac{e^{-\frac{i\pi t^2}{2}}}{(t - Y(\delta L))^{\frac{\alpha-2}{2\alpha}}} dt \right|^2},$$

$$\text{где } y(\delta L, M) = \sqrt{\frac{2n_0 \delta L}{\lambda}} \Delta \left(\frac{M}{N} \right)^{\frac{2\alpha}{\alpha+2}}; \quad Y(\delta L) = \sqrt{\frac{2n_0 \delta L}{\lambda}}$$

где M – число распространяющихся мод, N – полное число мод в МВС, α – параметр профиля показателя преломления, δL – удлинение МВС, n_0 – показатель преломления сердцевинки МВС, λ – длина волны света, z – переменная интегрирования. Используя полученную формулу для АХ, были построены зависимости амплитудного отклика от таких величин, как количество возбужденных модовых групп, параметра профиля показателя преломления, амплитуды модуляции длины МВС. Продемонстрированы эффективность и удобство применения метода АХ для анализа работы МВИ

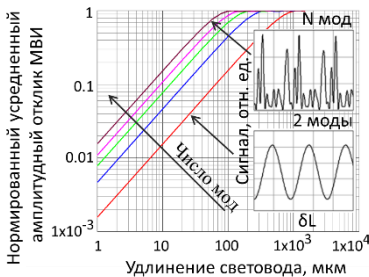


Рис. 2 Амплитудная характеристика МВИ при различном числе возбужденных мод.

при изменении параметров МВИ. Например, на рис. 2 представлен график АХ при различном числе возбужденных мод в «параболическом МВС». По результатам проведенного анализа сделан ряд важных выводов, некоторые из которых на первый взгляд не очевидны. Например, при малом числе возбужденных мод чувствительность «параболического» МВС к модуляции его длины существенно превышает чувствительность «ступенчатого» МВС, а при увеличении числа возбужденных мод

чувствительности примерно выравниваются; зависимость чувствительности МВИ от количества возбужденных мод носит линейный характер только для параболического профиля показателя преломления.

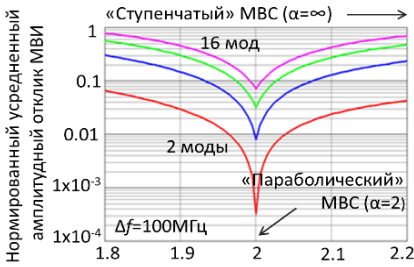


Рис. 3 Зависимость усредненного нормированного амплитудного отклика МВИ на модуляцию частоты лазера от параметра профиля показателя преломления.

увеличении длины МВС, что принципиально отличает данный механизм модуляции от модуляции длины; чувствительность МВИ с «параболическим» МВС существенно меньше, чем в случае «ступенчатого» МВС, что важно при учете шумов, вызванных флуктуациями частоты лазера (рис. 3).

АХ, полученные при модуляции частоты лазера, можно использовать для оценки модового состава в световоде. Зная длину волокна, девиацию частоты лазера и паспортные параметры волокна и изменяя при расчетах число возбужденных мод, можно найти амплитудную характеристику, соответствующую конкретному случаю возбуждения волокна. Помимо АХ для случая модуляции частоты лазера была проанализирована также передаточная функция (ПФ): ($P\Phi=AХ(\Delta f)/\Delta f$). На основе ПФ предложен способ оценки оптической полосы пропускания МВС без применения дорогостоящих и не всегда удобных импульсных устройств, что может быть важным практическим применением метода АХ (рис. 4).

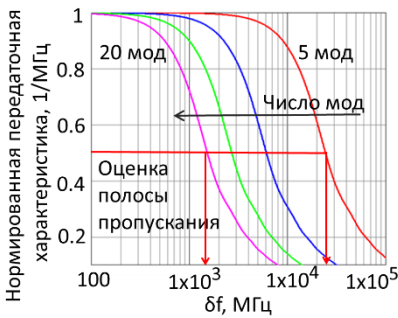


Рис. 4 Передаточная функция МВС при различном числе распространяющихся мод.

По аналогии с параграфом 2.2, в параграфе 2.3 рассмотрены АХ при изменении частоты лазера. По форме они аналогичны характеристикам, полученным при модуляции длины МВС (см. рис. 2). Проанализированы зависимости от различных параметров: количества возбужденных мод, длины МВС, параметра профиля показателя преломления и т.д. Также сделан ряд важных выводов, например: чувствительность МВИ к изменению частоты лазера возрастает при

увеличении длины МВС, что принципиально отличает данный механизм модуляции от модуляции длины; чувствительность МВИ с «параболическим» МВС существенно меньше, чем в случае «ступенчатого» МВС, что важно при учете шумов, вызванных флуктуациями частоты лазера (рис. 3).

АХ, полученные при модуляции частоты лазера, можно использовать для оценки модового состава в световоде. Зная длину волокна, девиацию частоты лазера и паспортные параметры волокна и изменяя при расчетах число возбужденных мод, можно найти амплитудную характеристику, соответствующую конкретному случаю возбуждения волокна. Помимо АХ для случая модуляции частоты лазера была проанализирована также передаточная функция (ПФ): ($P\Phi=AХ(\Delta f)/\Delta f$). На основе ПФ предложен способ оценки оптической полосы пропускания МВС без применения дорогостоящих и не всегда удобных импульсных устройств, что может быть важным практическим применением метода АХ (рис. 4).

В параграфе 2.4 введено понятие спектральной характеристики (СХ) сигналов МВИ. СХ – это зависимость нормированной ширины спектра сигналов МВИ от индекса дифференциальной фазовой модуляции (амплитуды внешнего возмущения). СХ предлагается применять для оценки величины внешних

воздействий больших амплитуд, когда АХ находится на участке насыщения (индекс ДФМ превышает π радиан), а спектр сигналов расширяется ввиду сильной нелинейности отклика МВИ на внешнее воздействие (рис. 5). Это открывает возможность увеличения динамического диапазона измерительного интерферометра.

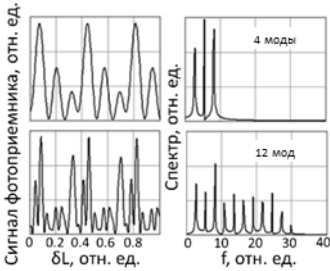


Рис. 5 Сигналы МВИ и их спектры для двух значений числа распространяющихся мод при линейном увеличении длины МВС.

В параграфе рассмотрены два случая изменения длины волокна: линейный (пилообразный) и гармонический. В случае гармонической модуляции показано, что ширина спектра сигнала подчиняется формуле Карсона: $\Delta\omega = (m + 1) \cdot \Omega$, где m - индекс однотоновой угловой модуляции, Ω - частота модуляции оптической частоты. Детально проанализирован процесс формирования сигнала и его спектра начиная с простейшего случая, при котором интерференционные максимумы различных пар интерферирующих мод совпадают при изменении длины световода, и заканчивая «реальным» случаем, когда в выражение для выходного сигнала МВИ вводятся случайные параметры, такие как амплитуды отдельных мод и постоянные, но случайные фазовые приращения, приобретаемые светом на неоднородностях. Показано, что учет указанных случайных параметров усиливает случайный характер сигналов МВИ и их спектров, однако не оказывает влияния на ширину усредненного нормированного спектра (рис. 5). Продемонстрировано, что СХ является «продолжением» возрастающего участка АХ. Значения индексов ДФМ, приводящие к насыщению АХ, соответствуют возрастающему участку СХ (рис. 6).

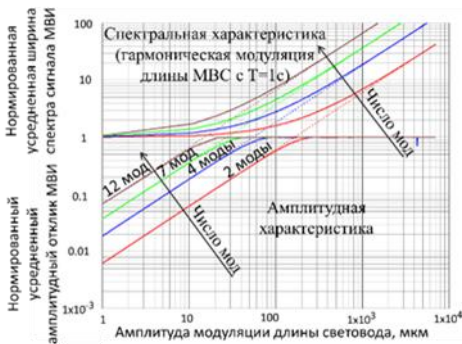


Рис. 6 Совмещенные АХ и СХ при различном числе возбужденных мод.

В параграфе рассмотрены два случая изменения длины волокна: линейный (пилообразный) и гармонический. В случае гармонической модуляции показано, что ширина спектра сигнала подчиняется формуле Карсона: $\Delta\omega = (m + 1) \cdot \Omega$, где m - индекс однотоновой угловой модуляции, Ω - частота модуляции оптической частоты. Детально проанализирован процесс формирования сигнала и его спектра начиная с простейшего случая, при котором интерференционные максимумы различных пар интерферирующих мод совпадают при изменении длины световода, и заканчивая

«реальным» случаем, когда в выражение для выходного сигнала МВИ вводятся случайные параметры, такие как амплитуды отдельных мод и постоянные, но случайные фазовые приращения, приобретаемые светом на неоднородностях. Показано, что учет указанных случайных параметров усиливает случайный характер сигналов МВИ и их спектров, однако не оказывает влияния на ширину усредненного нормированного спектра (рис. 5). Продемонстрировано, что СХ является «продолжением» возрастающего участка АХ. Значения индексов ДФМ, приводящие к насыщению АХ, соответствуют возрастающему участку СХ (рис. 6).

В параграфе 2.5 рассмотрено отношение сигнал/шум (С/Ш) с системами на основе МВИ. В выражении для отношения С/Ш учтены зависимости сигнальных и шумовых компонент от параметров МВС за счет использования соответствующих АХ. Проанализированы зависимости С/Ш от амплитуды сигнального воздействия, количества распространяющихся мод, параметра профиля показателя преломления,

девиации оптической частоты лазерного источника. Продемонстрировано, что С/Ш существенно (на 2-3 порядка) возрастает при параболическом профиле показателя преломления по сравнению со ступенчатым при равном количестве возбужденных мод.

Третья глава посвящена вопросам локализации внешнего воздействия в МВИ в условиях непрерывного возбуждения МВС. В параграфе 3.1 подробно рассмотрена проблема локализации, возможные варианты физических механизмов, на основе которых может быть реализована зависимость параметров выходного сигнала МВИ от координаты места воздействия на МВС. Предложен и обоснован механизм, который может быть использован для решения задачи локализации в МВИ с непрерывным режимом работы лазера. Он заключается в применении специальной конфигурации МВИ, при которой происходит увеличение

количества распространяющихся мод вдоль МВС (рис. 7), в отличие от традиционного МВИ с постоянным модовым составом. Изменение модового состава вдоль МВС обеспечивает зависимость характеристик выходного сигнала от координаты внешнего воздействия на МВС.



Рис. 7 Иллюстрация МВС с расширением модового состава вдоль продольной координаты. Стрелками условно обозначены возбужденные модовые группы.

В параграфе 3.2 приведен необходимый для дальнейшего рассмотрения анализ сигналов МВИ при постоянном числе распространяющихся мод вдоль МВС.

В параграфе 3.3 рассмотрены характеристики выходного сигнала МВИ при увеличении количества распространяющихся мод вдоль МВС. На примере МВИ, состоящего из двух последовательно соединенных МВС и модового контроллера, изменяющего количество возбужденных мод (рис. 8), было показано, что характеристики выходных сигналов МВИ зависят от количества распространяющихся на участке воздействия мод при неизменном числе мод на выходе МВС. Количество мод в первом МВС может варьироваться от минимального до максимального значения, а количество мод во втором МВС

фиксировано и всегда максимально. Выходные сигналы МВИ, вызванные внешним воздействием на первый сегмент при различном числе распространяющихся в нем мод, исследованы теоретически. Основное

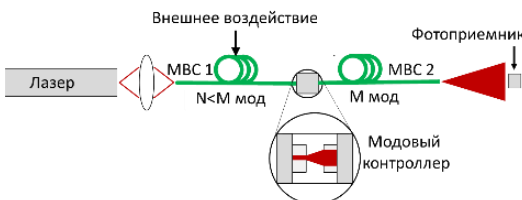


Рис. 8 Схема двухсекционного МВИ.

внимание уделено вопросам: как преобразуются сигналы ДФМ при прохождении модового контроллера (наиболее сложный вопрос, который, по нашим данным, не отражен в литературе), и что с ними происходит при прохождении второго МВС. Для этих целей разработана относительно простая модель амплитудно-фазовых преобразований. Применение этой модели подтвердило основное положение работы о том, что характеристики сигналов МВИ зависят от числа распространяющихся мод на участке МВС, подверженного внешнему возмущению. Сделаны следующие выводы:

1) Сигналы МВИ существенно зависят от количества распространяющихся мод на участке внешнего воздействия, вызывающего ДФМ. При этом изменяются амплитудные и спектральные характеристики интерференционных сигналов.

2) В МВС с изменяющимся числом распространяющихся мод индекс ДФМ, приобретенный сигналами на участках внешнего воздействия (с меньшим числом распространяющихся мод, чем на выходном участке), сохраняется до выходного торца многомодового световода.

В параграфе 3.4 рассмотрен вопрос локализации внешнего воздействия в МВИ с переменным модовым составом. Сигналы МВИ с увеличением количества мод вдоль МВС зависят от числа мод в месте воздействия, однако, при неизвестных параметрах воздействия, данных для определения места воздействия недостаточно. Для однозначной локализации произвольного внешнего воздействия предложена схема МВИ с двунаправленным возбуждением. В каждом из двух направлений реализуется постепенное увеличение количества распространяющихся мод от входного до выходного разветвителей (рис. 9). Сравнение и анализ сигналов двух противоположных направлений позволяет однозначно определить место произвольного возмущения. Рассмотрено три возможных случая локализации внешнего воздействия в зависимости от его амплитуды: случай относительно слабых воздействий (используются АХ), случай относительно больших воздействий (используются СХ) и промежуточный случай, когда в одном направлении сигнал соответствует возрастающему участку АХ, а в другом – участку насыщения АХ.

Введен т.н. параметр локализации ρ , равный отношению разности и суммы сигнальных откликов с противоположных концов двунаправленного МВИ.

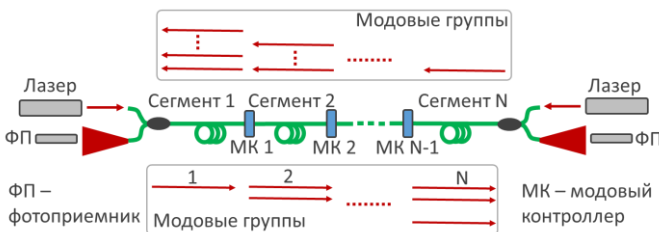


Рис. 9 Схема двунаправленного МВИ.

Аналитически показано, что ρ одинаково вычисляется для всех трех случаев внешних воздействий, не зависит от параметров внешнего воздействия, а зависит исключительно от числа распространяющихся мод в прямом и обратном направлении на участке внешнего воздействия $\rho = (2k - M) / (M)$, где M – максимальное число возбужденных мод в тракте, а k – число мод в данном сегменте в одном из направлений. Экспериментально продемонстрирована возможность локализации на примере тракта, состоящего из трех сегментов МВС для случаев воздействий относительно больших и относительно малых амплитуд (использования СХ и АХ соответственно) (рис. 10) (см. главу 5).

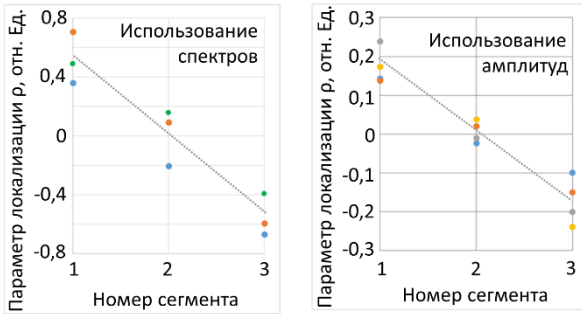


Рис. 10 Экспериментально полученные значения параметра локализации в линии из трех сегментов. Воздействия относительно больших амплитуд слева, малых - справа.

Показано, что число разрешимых зон ограничивается не максимальным числом модовых групп в данном волокне, как может показаться на первый взгляд, а уровнем шума в системе. Число разрешимых зон может превышать число модовых групп (при плавном перераспределении мощности от предыдущей моды к последующей). Показано, что число разрешимых зон локализации также зависит от параметров МВС: максимального числа модовых групп (M), длины биений мод (Λ_{01}), параметров внешнего воздействия (δL), параметров источника когерентного излучения (RIN), фотоприемного устройства и системы обработки сигнала.

В главе 4 изложены схемы и методики, в главе 5 – результаты экспериментальных исследований. Проведены измерения зависимости характеристик сигналов МВИ от количества распространяющихся в МВС мод в тракте с постоянным модовым составом. Экспериментально подтверждена зависимость характеристик сигналов МВИ (амплитуды, спектра) от числа мод в месте воздействия в тракте с увеличением числа мод вдоль МВС. Получены АХ и СХ в трактах с постоянным модовым составом, а также в трактах с увеличением числа мод вдоль МВС.

Параграф 3.5 посвящен анализу пространственного разрешения локализации в МВИ с переменным модовым составом. Рассмотрены вопросы: как близко могут располагаться два соседних места воздействия, как велико может быть число разрешимых зон в одном волоконном датчике. Введены простые модели, помогающие ответить на

Продемонстрирована возможность локализации внешнего воздействия на примере двунаправленной схемы, состоящей из трех сегментов МВС (рис. 10).

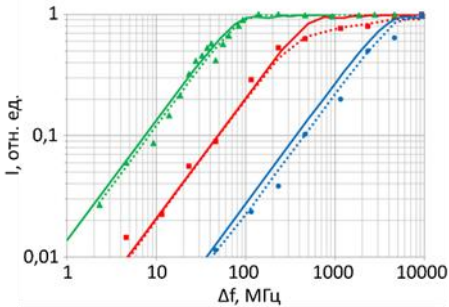


Рис. 11 Амплитудные характеристики 3-х световодов при модуляции частоты лазера: градиентный 5 км, ступенчатый 500 м и градиентный 500 м (слева направо). Точками отмечены экспериментальные результаты, сплошными линиями – результаты модельных расчетов, пунктирными линиями – результаты аналитических расчетов.

Исследованы сигналы МВИ при модуляции частоты лазера для волокон различных длин со ступенчатым и параболическим профилями показателя преломления (рис. 11). Продемонстрирована возможность оценки полосы пропускания МВС. Получены соответствующие амплитудные и спектральные характеристики. Продемонстрировано, что чувствительность МВИ к изменениям частоты лазера увеличивается с увеличением длины МВС, а также при использовании волокон со ступенчатым профилем показателя преломления.

В заключении сформулированы основные результаты работы. Кратко перечислим их:

- 1) Разработана и исследована модель распределенного МВИ с изменяющимся модовым составом когерентного излучения вдоль МВС. Показана зависимость характеристик выходных интерферометрических сигналов от распределения мощности по модам в месте воздействия на МВС. Продемонстрирована возможность локализации внешнего воздействия на МВС с изменяющимся модовым составом, работающий в режиме непрерывного возбуждения с однонаправленным или двунаправленным световыми потоками.
- 2) Разработана и детально изучена методика анализа выходных сигналов МВИ в зависимости от его различных параметров с использованием нормированных усредненных характеристик – амплитудных, спектральных, передаточных.
- 3) Выполнены расчеты различных характеристик МВИ с изменяющимся модовым составом, разносторонне показывающие особые отличительные свойства данных устройств. Проведен подробный анализ отношения сигнал/шум, минимального регистрируемого воздействия и пространственной разрешающей способности распределенного измерительного МВИ.
- 4) Разработаны, созданы и детально исследованы лабораторные макеты МВИ с изменяющимся модовым составом. Предложены и реализованы измерительные методики, позволяющие получить характеристики МВИ в различных режимах работы. Выполнены эксперименты, подтверждающие основные научные положения, выносимые на защиту.

Список цитируемой литературы

1. Layton M.R. Optical fiber acoustic sensor utilizing mode-mode interference [Текст] / Layton M.R., Bucaro J.A. // *Appl Optics*. - 1979. - Vol. 18. - I. 5. - PP. 666-670.
2. Кульчин Ю.Н. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей [Текст] / Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камшилин А.А., Ромашко Р.В. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 288 с.
3. Pinzon P.J. Dual-wavelength speckle-based SI-POF sensor for cost-effective detection of microvibrations [Текст] / Pinzon P.J., Montero D.S., Tapetado A., Vazquez C. // *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. - 2017. - Vol. 23. - I. 2.
4. Fujiwara E. Optical fiber specklegram sensor analysis by speckle pattern division [Текст] / Fujiwara E., Dos Santos M.F.M., Suzuki C.K. // *Applied Optics*. - 2017. - Vol. 56. - I. 6. - PP. 1585-1590.
5. Котов О.И. Особенности многоканального приема сигналов межмодового волоконно-оптического интерферометра: снижение амплитудного фединга [Текст] / Котов О.И., Косарева Л.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // *Письма в ЖТФ*. - 2000. - Том. 26. - Вып. 18. - С. 85-94.
6. Кульчин Ю. Н. Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью [Текст] / Кульчин Ю. Н., Витрик О.Б., Ланцов А. Д. // *Квант. электрон.* - 2006. - Том 36. - Вып. 4. - С. 339-342.
7. Distributed fiber optic sensor with location capability [Текст]: Patent US7514670 B2 -2009.
8. Leung C.-Y. Fiberoptic Line-Sensing System for Perimeter Protection Against Intrusion [Текст] / Leung C.-Y., Chang I.F., Hsu S. // *OFS proceedings*. - 1986. - PP. 113-116.
9. Juarez A.A. Modeling of Mode Coupling in Multimode Fibers With Respect to Bandwidth and Loss [Текст] / Juarez A.A., Krune E., Warm S., Bunge C.A., Petermann K. // *Journal of Lightwave Technology*. - 2014. - Vol. 32. - I. 8. - PP. 1549-1558.
10. Унгер Х.-Г. Планарные и волоконные оптические волноводы [Текст] / Унгер Х.-Г. - М.: Мир, 1980. - 656 с.
11. Gasulla I. Transfer function of multimode fiber links using an electric field propagation model: Application to Radio over Fibre Systems [Текст] / Gasulla I., Capmany J. // *Optics Express*. - 2006. - Vol. 14. - I. 20. - PP. 9051-9070.
12. Castro J. Mode partition noise and modal-chromatic dispersion interaction effects on random jitter [Текст] / Castro J., Pimpinella R., Kose B., Lane B. // *Journal of Lightwave Technology*. - 2013. - Vol. 31. - I. 15. - PP. 2629-2638.

13. Rawson E.G. Frequency dependence of modal noise in multimode optical fibers [Текст] / Rawson E.G., Goodman J.W., Norton R.E. // Journal of the Optical Society of America. - 1980. - Vol. 70. - I. 8. - PP. 968-976.

Основное содержание диссертации опубликовано работах

Публикации, входящие в Перечень ВАК:

1. Котов О.И. Зависимость сигналов межмодового волоконного интерферометра от распределения мощности по модам [текст] / Котов О.И., Чапало И.Е., Медведев А.В. // Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. - В. 12. С. 31-36.
2. Котов О.И. Локализация внешнего воздействия в распределенном межмодовом волоконном интерферометре [текст] / Котов О.И., Чапало И.Е. // Письма в Журнал технической физики. – 2015. – Т. 41. - В. 23. С. 54-60.
3. Котов О.И. Сигналы межмодового волоконного интерферометра, вызванные модуляцией частоты лазера [текст] / Котов О.И., Чапало И.Е., Петров А.В. // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42. - В. 1. С. 25-32.
4. Медведев А.В. Применение цифровой обработки сигналов в системе охраны на основе межмодовой интерференции в волоконном световоде/ Медведев А.В., Чапало И.Е. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2010. - Том 101. - Вып. 3. - С. 157-162.

Издания, входящие в международные системы цитирования SCOPUS и Web of Science:

5. Kotov O.I. Mode-mode fiber interferometer with impact localization ability [текст] / Kotov O.I., Chapalo I.E. // Proceedings of SPIE. – 2016. V. 9899.
6. Kotov O.I. Mode-mode interference sensor with increasing number of modes along the multimode optical fiber [текст] / Kotov O.I., Chapalo I.E., Medvedev A.V. // Proceedings of SPIE. – 2014. V. 9203.

Другие публикации:

7. Петров А.В. Анализ сигналов межмодового интерферометра при модуляции частоты лазера: метод амплитудных характеристик и оценка полосы пропускания многомодового световода [текст] / Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады. – 2016. – с. 133-137.
8. Петров А.В. Оценка полосы пропускания многомодового световода по сигналам межмодового волоконного интерферометра [текст] / Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2015. – с. 5-8.
9. Тасбулатов А.А. Волоконно-оптические фазовые модуляторы для многомодовых интерферометров [текст] / Тасбулатов А.А., Чапало И.Е., Котов

О.И. // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2015. – с. 11-13.

10. Котов О.И. Влияние распределения мощности по модам на сигналы межмодового волоконного интерферометра [текст] / Котов О.И., Медведев А.В., Чапало И.Е., Девятьяров Д.Р. // Сборник трудов Международной научной конференции «Лазеры. Измерения. Информация». – 2013. – с. 86-87.

11. Девятьяров Д.Р. Особенности регистрации и обработки спекл-картин на выходе многомодового световода с использованием ПЗС-матрицы и программного пакета LabVIEW [текст] / Девятьяров Д.Р., Чапало И.Е., Медведев А.В., Котов О.И. // Материалы международной научно-практической конференции ХLI Неделя науки СПбГПУ. – 2012. – Т. 9. С. 5.

12. Девятьяров Д.Р. Системы охраны периметра на волоконном кабеле [текст] / Девятьяров Д.Р., Чапало И.Е., Медведев А.В. // Материалы международной научно-практической конференции ХL Неделя науки СПбГПУ. – 2011. – Т. 9. С. 10-12.

13. Котов О.И. Исследование модовых шумов в многомодовых световодах с селективным возбуждением мод / Котов О.И., Петров А.В., Чапало И.Е. // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ. – 2015. – с. 10-14.

14. Котов О.И. Шумовые параметры фотодиодных приемников/ Котов О.И., Тасбулатов А.А., Чапало И.Е. // Научный форум с международным участием «Неделя науки СПбПУ»: материалы научно-практической конференции. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций СПбПУ. – 2015. – с. 14-17.

15. Петров А.В. Модовый шум в многомодовых волоконных световодах, вызванный флуктуациями частоты излучения лазера/ Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. // XVIII Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Докл. – 2015. – с. 39-41.

16. Петров А.В. Сравнение методов усреднения сигналов межмодового волоконного интерферометра / Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций. – 2016. – с. 146-148.

17. Петров А.В. Пространственное усреднение при многоканальном приеме сигнала межмодового волоконного интерферометра для снижения фединга / Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. 14-19 ноября 2016 года. Лучшие доклады. – 2016. – с. 113-118.