



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Маркварт Александр Александрович

**Многопараметрические волоконно-оптические измерения на
основе спектральной интерферометрии**

1.3.4. Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2022

Работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель: **Лиокумович Леонид Борисович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Официальные оппоненты: **Филатов Юрий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина),

Волков Петр Витальевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией прецизионной оптической диагностики Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Ведущая организация: **АО «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», г. Санкт-Петербург.**

Защита диссертации состоится «15» ноября 2022 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.1.3.4.05 ФГАОУ ВО «СПбПУ» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 2, аудитория 347).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru ФГАОУ ВО «СПбПУ».

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения (организации), просим направлять по указанному адресу в диссертационный совет У.1.3.4.05.

Автореферат разослан “___” октября 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.1.3.4.05
кандидат физико-математических наук
Петров Александр Викторович



Общая характеристика работы

Актуальность работы

Волоконно-оптические интерферометрические датчики являются предметом активных научных исследований и прикладных разработок [1]. Мотивацией использования таких датчиков является ряд их положительных качеств, отличающих волоконно-оптические датчики от электрических аналогов. В эти качества входят высокая точность измерений, компактные размеры, электромагнитная нейтральность, устойчивость к высоким перепадам температуры, давления и влажности, устойчивость к химической коррозии, биологическая совместимость, электробезопасность. Благодаря этому такие датчики особенно востребованы при построении сенсорных систем в местах с агрессивными условиями среды и с повышенными требованиями к электро-взрывобезопасности и компактности, например, в нефтегазовой промышленности [2], для контроля природных и техногенных объектов [3], в электроэнергетике [4], ядерной энергетике [5], медицине [6] и в других областях [7].

Важным направлением волоконно-оптических интерферометрических сенсорных систем являются многопараметрические системы, позволяющие одновременно проводить измерения нескольких физических воздействий разной природы. Такие системы необходимы как при комплексном контроле ряда физических величин, так и для компенсации паразитных влияний одной физической величины при измерении целевой. Многопараметрические сенсорные системы могут быть построены по разным схемам [8]. Распространены схемы с мультиплексированными волоконными брэгговскими решетками (ВБР), схемы с мультиплексированными волоконными интерферометрами Фабри-Перо (ВИФП). Менее изученными являются схемы с межмодовым волоконным интерферометром с одномодовым подключением (МВИОП). Такой интерферометр представляет собой последовательно соединенные одномодовый (ОМ) световод, многомодовый (ММ) световод (или многомодовую секцию) и одномодовый световод. В англоязычной литературе такие структуры называют SMS-структурами, от англ. singlemode-multimode-singlemode [9].

Как правило, опрос волоконно-оптических интерферометров (ВОИ) для целей многопараметрических измерений производится методом спектральной интерферометрии путем регистрации зависимости интенсивности прошедшего через интерферометры света от длины волны, которую, после нормировки, называют спектральной передаточной функцией (СПФ) интерферометров [10]. Данный подход позволяет достичь высоких точностей измерений, большого динамического диапазона измерений, а также предоставляет возможность проведения абсолютных измерений. Демодуляция СПФ интерферометров производится стандартными методами

цифровой обработки сигнала. Для целей многопараметрических измерений зачастую применяются подходы, основанные на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) зарегистрированных СПФ.

Непосредственно регистрация СПФ интерферометров производится при помощи специальной опросной аппаратуры, которая может включать в себя перестраиваемые лазеры, широкополосные источники света, узкополосные перестраиваемые фильтры, фотоприемники, спектрометры. Как правило, опросная аппаратура имеет достаточно высокую стоимость. Однако прогресс в области электроники и широкая популярность портативных устройств привели к развитию новых волоконно-оптических сенсорных систем, в которых опрос датчиков производится при помощи спектрометров на основе цифровых камер смартфонов [11].

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных многопараметрическим волоконно-оптическим сенсорным системам, открытым остается ряд вопросов, касающихся как теоретического описания таких систем и способов обработки сигналов, так и рассмотрения стабильности работы опросных устройств. В частности, недостаточно освещены теоретические аспекты МВИОП для случая одновременного измерения нескольких физических величин различной природы, например, растяжения, температуры и изгиба (РТИ). Не уделено должного внимания анализу методических погрешностей многопараметрических измерений при демодуляции СПФ интерферометров. Не проанализирована стабильность работы новых систем опроса ВОИ, включающих в себя спектрометры на основе цифровой камеры смартфона.

В связи с вышеизложенным, **являются актуальными:** разработка аналитического аппарата, описывающего спектральные передаточные функции МВИОП при одновременном измерении физических воздействий разной природы; анализ применения дискретного преобразования Фурье для многопараметрических измерений волоконно-оптическими интерферометрами; анализ методических погрешностей многопараметрических измерений и разработка методов их снижения; анализ стабильности работы систем опроса волоконно-оптических интерферометров, включающих в себя спектрометр на основе цифровой камеры смартфона и поиск путей ее повышения.

Цель работы: улучшение измерительных возможностей многопараметрических волоконно-оптических интерферометрических сенсорных систем со спектральным опросом в плане их аналитического описания, снижения погрешностей и повышения стабильности.

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

1) Разработать физико-математические модели спектральных передаточных функций МВИОП с параболической и ступенчатой многомодовыми секциями при одновременном изменении значений растяжения, температуры и изгиба секций. На основе разработанной модели рассмотреть возможность осуществления одновременных измерений растяжения, температуры и изгиба при помощи МВИОП с параболической и ступенчатой многомодовыми секциями.

2) Рассмотреть обработку спектральных передаточных функций МВИОП при помощи дискретного преобразования Фурье для измерения растяжения, температуры и изгиба с получением стабильных и линейных откликов на воздействия.

3) Проанализировать методическую погрешность многопараметрических измерений при помощи волоконно-оптических интерферометров и обработки их сигналов посредством дискретного преобразования Фурье и разработать способ ее подавления без существенного увеличения случайной погрешности.

4) Рассмотреть особенности опроса волоконно-оптических интерферометров при помощи спектрометра на основе цифровой камеры смартфона и проанализировать стабильность шкалы длин волн такого спектрометра во время проведения измерений.

5) Разработать метод калибровки шкалы длин волн спектрометра на основе цифровой RGB-камеры, позволяющий компенсировать дрейф шкалы длин волн спектрометра при одновременном опросе волоконно-оптических интерферометров без необходимости установки дополнительных калибровочных устройств в оптический канал спектрометра.

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

1) Получены теоретические выражения для приращений разностей постоянных распространения мод в параболическом и ступенчатом многомодовых световодах при изменении растяжения, температуры и изгиба в приближении слабонаправляющего световода, удобные для анализа многопараметрических измерений. На основе полученных выражений сделаны выводы о возможности проведения одновременных измерений данных воздействий посредством межмодовых волоконных интерферометров с одномодовым подключением.

2) Апробирована обработка спектральных передаточных функций МВИОП со ступенчатой многомодовой секцией при помощи дискретного преобразования Фурье для проведения многопараметрических измерений физических воздействий. Получены теоретические выражения для приращений частот и фаз компонент полигармонической спектральной передаточной функции МВИОП со ступенчатой многомодовой секцией при изменении растяжения, температуры и изгиба. Экспериментально реализован

вариант МВИОП со ступенчатой многомодовой секцией и успешно проведено одновременное измерение растяжения и изгиба многомодовой секции.

3) Предложен, а также численно и экспериментально апробирован подход синтеза специальных весовых оконных функций, позволяющий снизить методическую погрешность многопараметрических измерений при демодуляции бигармонической спектральной передаточной функции мультиплексированных волоконно-оптических интерферометров посредством дискретного преобразования Фурье, применение которого, в отличие от использования стандартных весовых оконных функций, не приводит к существенному увеличению случайной погрешности.

4) Экспериментально произведен опрос многомодовых волоконных брэгговских решеток при помощи спектрометра на основе цифровой камеры смартфона. Реализована калибровка шкалы длин волн спектрометра по спектральному отклику одной из двух мультиплексированных решеток с одновременным опросом второй решетки.

5) Предложен метод калибровки шкалы длин волн спектрометра на основе цифровой RGB-камеры по распределению цветового тона фотографий спектров, позволяющий калибровать шкалу длин волн одновременно с проведением измерений, без необходимости введения дополнительных калибровочных элементов в оптический канал спектрометра. Экспериментально реализован опрос волоконного интерферометра Фабри-Перо с успешной компенсацией дрейфа шкалы длин волн спектрометра благодаря применению предложенного подхода.

Научная и практическая значимость диссертации.

Теоретическая значимость результатов диссертации состоит в получении математических выражений, позволяющих производить аналитический расчет приращений разностей постоянных распространения мод в параболических и ступенчатых многомодовых световодах при изменении растяжения, температуры и изгиба световодов, которые могут быть использованы при теоретических исследованиях волоконно-оптических систем, содержащих параболические и ступенчатые многомодовые световоды, в условиях внешних воздействий.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

– Полученные математические выражения для приращений разностей постоянных распространения мод в многомодовых световодах при изменении растяжения, температуры и изгиба, а также полученные выражения для приращений частот и фаз гармоник спектральной передаточной функции МВИОП при изменении растяжения, температуры и изгиба световодов могут непосредственно использоваться при разработке практических многопараметрических волоконно-оптических датчиков на основе МВИОП.

– Предложенный подход синтеза специальных весовых оконных функций, используемых в дискретном преобразовании Фурье при демодуляции спектральных передаточных функций волоконно-оптических интерферометров, может использоваться в различных задачах полигармонического анализа сигналов различной природы, требующих высокого разрешения измерений.

– Предложенный метод калибровки шкалы длин волн спектрометра на основе цифровой RGB-камеры по распределению цветового тона фотографий спектров может быть непосредственно использован при создании бюджетных спектрометров с улучшенными точностными характеристиками на основе смартфонов и других портативных устройств.

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

1) Полученные теоретические выражения для приращений разностей постоянных распространения мод параболического и ступенчатого многомодовых световодов при изгибе световода позволяют оценить изменения параметров спектральной передаточной функции МВИОП, что даёт возможность рассчитывать характеристики измерителей изгиба на основе таких интерферометров.

2) На основе полученных теоретических выражений для приращений разностей постоянных распространения мод параболического и ступенчатого многомодовых световодов при растяжении, изменении температуры и изгибе световода показана связь погрешности одновременных измерений растяжения, температуры и изгиба от дисперсионных характеристик световода и параметров зарегистрированной спектральной передаточной функции МВИОП, используемого для этих измерений.

3) Предложенный метод синтеза специальных весовых оконных функций, используемых при демодуляции бигармонической спектральной передаточной функции волоконно-оптических интерферометров посредством дискретного преобразования Фурье, позволяет снизить методическую погрешность измерений, вызванную эффектом спектрального просачивания, с меньшим увеличением случайной погрешности, чем в случае использования стандартных весовых оконных функций.

4) Предложенный метод калибровки шкалы длин волн спектрометра на основе цифровой RGB-камеры по распределению цветового тона фотографий спектров позволяет производить калибровку шкалы длин волн спектрометра непосредственно в ходе измерений без необходимости проведения дополнительных калибровочных измерений и введения дополнительных калибровочных элементов в оптический канал спектрометра.

Публикации и апробация работы.

По материалам диссертации опубликовано 10 работ: 5 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы Scopus, Web of Science, РИНЦ и перечень ВАК РФ, 3 – в сборниках материалов международных конференций, индексируемых в Scopus, 2 – в сборниках материалов конференций, входящих в список РИНЦ. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях различных уровней: всероссийской конференции по волоконной оптике «ВКВО-2021» (2021 г., г. Пермь), международной конференции «International youth conference on electronics, telecommunications and information technologies (YETI-2021)» (2021 г. Санкт-Петербург), международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2022» («ЦОС-2022») (2022 г., Москва).

Внедрение результатов работы.

Результаты работы используются в лаборатории волоконной оптики института электроники и телекоммуникаций СПбПУ, в частности они использованы при выполнении:

- 1) научного проекта № 19-32-90262 при финансовой поддержке РФФИ;
- 2) Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2020-0024).
- 3) научного проекта № 4.2.1.2. в рамках проекта повышения конкурентноспособности 5-100, предложенного Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, содержащего 187 наименований, и 3 приложений.

Объем работы составляет 197 страниц, включая 5 таблиц и 104 рисунка.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи работы, представлена научная новизна и практическая значимость полученных в работе результатов, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел содержит обзор литературы по теме диссертации. В ней приведён обзор известных схем построения волоконно-оптических интерферометров, анализ ряда научных работ, посвященных разработке и применению волоконно-оптических интерферометров для проведения многопараметрических измерений, а также посвященных алгоритмам обработки сигнала, используемым для демодуляции измеряемых воздействий и системам спектрального опроса интерферометров. В заключительном пункте подводятся итог приведённого обзора, и приводится обоснование цели и задач диссертации.

Второй раздел посвящен разработке физико-математических моделей спектральных передаточных функций (СПФ) межмодовых интерферометров с одномодовым подключением (МВИОП), имеющих в своем составе многомодовый (ММ) световод с параболическим или со ступенчатым профилем показателя преломления. Разработанные модели позволяют рассчитывать СПФ при изменении растяжения, температуры и изгиба (РТИ) ММ секции, и проводить оценку погрешностей одновременных измерений данных воздействий. Для построения моделей **в пункте 2.1.** приведены общие сведения из теории многомодовых световодов. **В пункте 2.2** приведены общие выражения для СПФ МВИОП и для изменения параметров световодов при изменении РТИ. В данной работе рассматривается классическая схема МВИОП, в которой подводящий одномодовый (ОМ) световод соосно стыкуется с чувствительной ММ секцией длиной L и

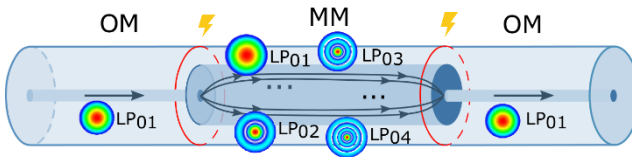


Рисунок 1. Схема МВИОП

выходным ОМ световодом (рисунок 1). В этом случае мода подводящего ОМ световода возбуждает только осесимметричные

линейно поляризованные LP_{0p} моды ММ световода с коэффициентами возбуждения A_{0p}^2 , постоянными распространения β_{0p} и общим количеством P на длине волны λ . Спектральная передаточная функция МВИОП может быть представлена в виде следующей суммы косинусоидальных компонент:

$$S(\lambda) = \sum_{p=1}^P A_{0p}^4 + \sum_{p=1}^P \sum_{\mu=p+1}^P 2A_{0p}^2 A_{0\mu}^2 \cos [\Delta\beta_{0p,0\mu}(\lambda) \cdot L] \quad (1)$$

где разность постоянных распространения LP_{0p} моды и $LP_{0\mu}$ моды обозначена как $\Delta\beta_{0p,0\mu} = \beta_{0p} - \beta_{0\mu}$. Для расчета СПФ при приращениях температуры ΔT , растяжения $\Delta \epsilon$, и квадрата кривизны изгиба $\Delta \rho^2$ в следующих пунктах были получены соответствующие теоретические выражения для приращений к β_{0p} и к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$. Расчет β_{0p} изогнутого световода был произведен при помощи метода малых возмущений. Для этого **в пункте 2.3** получено общее выражение для приращений второго порядка малости к постоянным распространения диэлектрического волновода при равномерном его возмущении вдоль оси. На его основе **в пунктах 2.4.2 и 2.5.2** получены выражения для приращений к β_{0p}^2 и к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ мод при изгибе ММ световодов. Показано, что моды световода с параболическим профилем показателя преломления испытывают одинаковые приращения к β_{0p}^2 , в то время как моды световода со ступенчатым профилем показателя преломления испытывают неодинаковые приращения к β_{0p}^2 : LP_{0p} моды все более высоких порядков будут испытывать все меньшие приращения к β_{0p}^2 . Также показано,

что при изгибе параболического световода приращения к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ мод пропорциональны $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ с коэффициентом пропорциональности, не зависящим от номеров мод, а при изгибе ступенчатого световода – не пропорциональны: разности постоянных распространения комбинаций LP₀₁ моды с остальными модами испытывают наибольшее приращение, меньшие приращения к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ имеют комбинации LP₀₂ моды с модами более высокого порядка и т.д. Ниже представлены выражения для приращений к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ параболического световода (3) и ступенчатого световода (4):

$$\frac{\partial(\Delta\beta_{0p,0\mu})}{\partial\rho^2} = \frac{a^2}{4 \cdot \Delta} \Delta\beta_{0p,0\mu} \quad (2)$$

$$\frac{\partial\Delta\beta_{0p,0\mu}^b}{\partial\rho^2} = 8k_0^4 n_1^4 a^4 \left(\frac{1}{\beta_{0p}} \sum_{q=1}^Q \frac{1}{(2q+1)^2 - (2p)^2} \frac{v_{0p}^2 v_{1q}^2}{(v_{1q}^2 - v_{0p}^2)^4} - \frac{1}{\beta_{0\mu}} \sum_{q=1}^Q \frac{1}{(2q+1)^2 - (2\mu)^2} \frac{v_{0\mu}^2 v_{1q}^2}{(v_{1q}^2 - v_{0\mu}^2)^4} \right) \quad (3)$$

где a – радиус сердцевинны многомодового световода, $\Delta = (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$ – относительная разность показателей преломления сердцевинны n_1 и оболочки n_2 ММ световода, $k_0 = 2\pi/\lambda$ – волновое число, v_{lp} – p -й нуль функции Бесселя $J_l(v)$, Q – количество направляемых LP_{1q} мод.

В пунктах 2.4.1 и 2.4.2 произведен расчет приращений к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ при изменении растяжения и температуры на основе известных выражений для β_{0p} параболического и ступенчатого световодов и выражений для приращений к n_1 , n_2 и a в приближении слабонаправляющего световода. На основе данного расчета показано, что можно записать следующие выражения для параболического (4) и для ступенчатого (5) световодов соответственно

$$\frac{\partial(\Delta\beta_{0p,0\mu})}{\partial\varepsilon} = \left(\sigma - \frac{n_2^2 P}{2} \right) \Delta\beta_{0p,0\mu}, \quad \frac{\partial(\Delta\beta_{0p,0\mu})}{\partial T} = \left[\frac{n_1 \mu_1 - n_2 \mu_2}{n_1^2 - n_2^2} - \left(\frac{\mu_1}{n_1} + \alpha \right) \right] \Delta\beta_{0p,0\mu} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\Delta\beta_{0p,0\mu})}{\partial\varepsilon} = \left(\frac{n_1^2 P}{2} + 2\sigma \right) \Delta\beta_{0p,0\mu}, \quad \frac{\partial(\Delta\beta_{0p,0\mu})}{\partial T} = - \left(\frac{\mu_1}{n_1} + 2\alpha \right) \Delta\beta_{0p,0\mu}. \quad (5)$$

где σ – коэффициент Пуассона, $P = p_{12} - \sigma \cdot (p_{11} + p_{12})$, p_{11} и p_{12} – коэффициенты фотоупругости, $\mu_{1,2}$ – термооптические коэффициенты материалов сердцевинны и оболочки, α – тепловой коэффициент расширения световода. Таким образом, показано, что при изменении растяжения или температуры и параболического, и ступенчатого световодов приращения к $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ мод пропорциональны $\Delta\beta_{0p,0\mu}$ с коэффициентом пропорциональности, не зависящим от номеров мод. На основе полученных выражений **в пунктах 2.4.3 и 2.5.3** проведен анализ возможности одновременных измерений растяжения, температуры и изгиба при помощи МВИОП. Одновременные измерения РТИ при помощи МВИОП возможны при оценке приращений аргументов косинусоидальных компонент СПФ на трех разнесенных друг от друга длинах волн. При такой оценке на двух длинах волн одновременные измерения РТИ возможны только при помощи МВИОП со ступенчатой ММ

секцией. При такой оценке на одной длине волны одновременные измерения РТИ практические невозможны, но возможны одновременные измерения или растяжения и изгиба или температуры и изгиба при помощи МВИОП со ступенчатой ММ секцией.

В работе показано, что погрешности вышеуказанных одновременных измерений определяются дисперсионными параметрами многомодового световода, входящего в состав МВИОП. Они оцениваются по формуле $\delta X = \text{abs}(K_{\text{ch}}^{-1}) \cdot \delta Y$, где $\delta X = [\delta \varepsilon; \delta T; \delta \rho^2]$ – столбец погрешности искомого физических величин, δY – столбец погрешности измеряемых по СПФ МВИОП параметров, K_{ch} – характеристическая матрица МВИОП, abs – операция поэлементного взятия модуля в матрице. Матрица K_{ch} может быть составлена на основе полученных в работе теоретических выражений для приращений к $\Delta \beta_{0p,0\mu}$. В качестве примера в пунктах 2.4.3 и 2.5.3 приводится случай, в котором предполагается косвенная оценка приращений аргументов компонент СПФ на заданных длинах волн λ_i по их спектральному сдвигу $\Delta \lambda_{p,\mu} |_{\lambda_i}$ в окрестностях этих длин волн. Для МВИОП с параболической ММ секцией получены следующие выражения для составления матрицы K_{ch}

$$\left. \frac{\Delta \lambda_{p,\mu}}{\Delta \chi} \right|_{\lambda_i} = - \frac{k_\chi}{k_\lambda} \Big|_{\lambda_i}, \quad k_\varepsilon = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2} (2\sigma - n_2^2 P + 2)}{2an_1}, \quad k_T = \frac{n_1 \mu_1 - n_2 \mu_2 - \mu_1 (n_1^2 - n_2^2) / n_1}{an_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (6)$$

$$k_\rho = \frac{an_1}{2 \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad k_\lambda(\lambda) = \frac{1}{n_1^2} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} + \frac{k_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\pi an_1} - \frac{n_1 \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - n_2 \frac{\partial n_2}{\partial \lambda}}{an_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

Здесь символ χ обозначает либо ε , либо T , либо ρ^2 . А для МВИОП со ступенчатой ММ секцией получены следующие выражения для составления матрицы K_{ch} : для растяжения и температуры, где χ обозначает либо ε , либо T

$$\left. \frac{\Delta \lambda_{p,\mu}}{\Delta \chi} \right|_{\lambda_i} = - \frac{k_\chi}{k_\lambda} \Big|_{\lambda_i}, \quad k_\varepsilon = \frac{n_1^2 P}{2} + 2\sigma + 1, \quad k_T = - \left(\frac{\mu_1}{n_1} + \alpha \right), \quad k_\lambda = \frac{k_0}{2\pi} - \frac{1}{n_1} \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} \quad (7)$$

$$\text{и для изгиба: } \left. \frac{\Delta \lambda_{p,\mu}}{\Delta \rho^2} \right|_{\lambda_i} = - \left. \frac{\partial \beta_{0p,0\mu}^b}{\partial \rho^2} \frac{1}{k_\lambda \cdot \Delta \beta_{0p,0\mu}} \right|_{\lambda_i} \quad (8)$$

Третий раздел посвящен вопросам цифровой обработки спектральных передаточных функций многопараметрических волоконно-оптических интерферометров посредством дискретного преобразования Фурье (ДПФ). В пункте 3.1 данного раздела приведена постановка задачи. При измерении СПФ интерферометров система опроса регистрирует набор отсчетов S_i в зависимости от длины волны света в вакууме $S_i = S(\lambda_i)$, где i – номер отсчета, с шагом $\Delta \lambda$ в спектральном окне $\Delta \lambda$ с центром диапазона сканирования λ_0 . Также может рассматриваться зависимость $S(f_i)$ в равномерной шкале

оптических частот f . Задача демодуляции СПФ сводится к задаче оценки частот и фаз гармонических компонент следующей последовательности

$$v(i) = w(i) \left\{ \bar{S} + \sum_k^K S_k \cos [\omega_k \cdot i + \theta_k] \right\} \quad (9)$$

где $w(i)$ – используемое весовое окно, ω_k – круговые частоты в радианах, θ_k – фазы, которые зависят от разности оптических путей (РОП) интерферирующих волн. Фурье-образ последовательности имеет вид

$$V(\omega) = \bar{S} \cdot W(\omega) + 0,5 \sum_{k=1}^K S_k \cdot \exp(j\theta_k) \cdot W(\omega - \omega_k) + 0,5 \sum_{k=1}^K S_k \cdot \exp(-j\theta_k) \cdot W(\omega + \omega_k) \quad (10)$$

где $W(\omega)$ – Фурье-образ $w(i)$. Оценка частот осуществляется по положениям максимумов $|V(\omega)|$, а фаз – по аргументам $\psi = \arg[V(\omega)]$ в области максимумов.

Пункт 3.2 посвящен демодуляции СПФ МВИОП со ступенчатой ММ секцией при изменении РТИ. **В пункте 3.2.2** получены аналитические соотношения для оценки приращений частот и фаз гармонических компонент полигармонической последовательности $S(\lambda_i)$ МВИОП со ступенчатой ММ секцией при изменении растяжения, температуры:

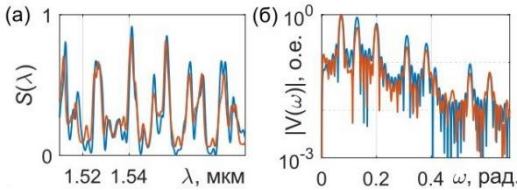
$$\frac{\partial \omega_{p,\mu}}{\partial \chi} = \Delta_\lambda k_\chi \frac{2(\mu^2 - p^2)L}{a^2 \pi n_1}, \quad \frac{\partial \theta_{p,\mu}}{\partial \chi} = \lambda_0 k_\chi \frac{2(\mu^2 - p^2)L}{a^2 \pi n_1} \quad (11)$$

где χ обозначает либо ε , либо T , а коэффициенты k_χ определяются выражением (7); а также получены соотношения для случая изгиба:

$$\frac{\partial \omega_{p,\mu}}{\partial \rho^2} = -\Delta_\lambda \frac{192\pi^3 n_1^3 a^4 R_{p,\mu}^{\text{SUM}} L}{\lambda_0^4}, \quad \frac{\partial \theta_{p,\mu}}{\partial \chi} = \frac{64\pi^3 n_1^3 a^4 R_{p,\mu}^{\text{SUM}} L}{\lambda_0^3} \quad (12)$$

$$\text{где } R_{p,\mu}^{\text{SUM}} = \sum_{q=1}^Q \frac{1}{(2q+1)^2 - (2p)^2} \frac{v_{0p}^2 v_{1q}^2}{(v_{1q}^2 - v_{0p}^2)^4} - \sum_{q=1}^Q \frac{1}{(2q+1)^2 - (2\mu)^2} \frac{v_{0\mu}^2 v_{1q}^2}{(v_{1q}^2 - v_{0\mu}^2)^4} \quad (13)$$

В пункте 3.2.3 проведены численные моделирования СПФ МВИОП в программном пакете «Optical fibre toolbox» MATLAB [12] и в пакете COMSOL при изменении растяжения, температуры и изгиба. **В пункте 3.2.4** приведены результаты экспериментального исследования МВИОП для случая одновременного измерения растяжения и изгиба. На рисунке 2



приведены рассчитанные и экспериментальные СПФ и их модули ДПФ. Параметры МВИОП были следующими: одномодовый световод – SMF-28 с диаметром сердцевины 8,2 мкм, многомодовый световод – FG050LGA Thorlabs с диаметром сердцевины 50 мкм длиной 25 см.

Рисунок 2. СПФ МВИОП (а) и его модуль ДПФ (б). Синие кривые – численное моделирование, красные – эксперимент.

В пункте 3.2.3 показано, что применение ДПФ позволяет выделить гармонические компоненты СПФ и получить линейный отклик при изменении РТИ в широком диапазоне измерений при применении оконной функции, в частности, было использовано окно Дольфа-Чебышева (-100 дБ). Аналитические оценки хорошо совпали с численными расчетами, как показано на рисунке 3 для некоторых зависимостей фаз гармоник $S(\lambda_i)$.

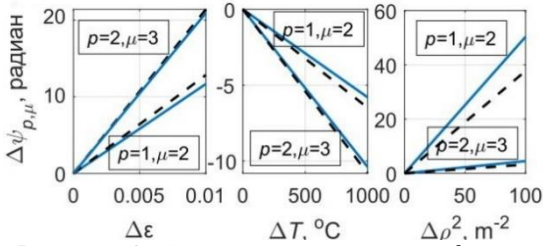


Рисунок 3. Зависимости $\Delta\psi_{p,\mu} \approx \Delta\theta_{p,\mu}$ от приращений растяжения, температуры и изгиба. Синие кривые – числ. моделир., черный пунктир – теоретические оценки.

показано, что следует выбирать экстремумы ДПФ, в которые попадает только одна гармоническая компонента СПФ. **В пункте 3.2.4** представлена реализация одновременного измерения растяжения и изгиба в диапазоне изменений ϵ от 0 до 0,06% и в диапазоне изменения ρ от 0,656 м⁻¹ до 1,358 м⁻¹. Результаты эксперимента хорошо совпали с численными расчетами и аналитическими оценками (рисунок 5).

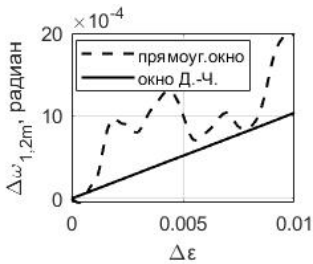


Рисунок 4. $\Delta\omega_{1,2m}(\Delta\epsilon)$ с прямоуг. окном и с окном Дольфа-Чебышева-100дБ.

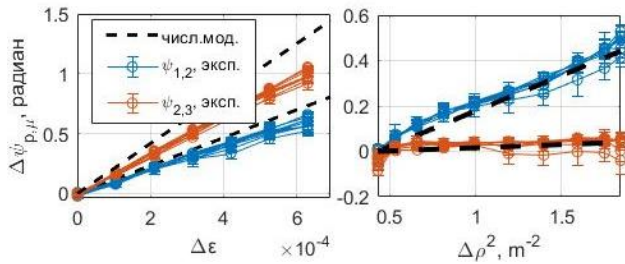


Рисунок 5. Зависимости $\Delta\psi_{p,\mu}$ для разных фиксированных значений ρ (слева) и ϵ (справа).

В пункте 3.3 предложен подход синтеза специальных оконных функций. Показано, что использование данного подхода позволяет снижать методические погрешности измерений, вызванные эффектом спектрального просачивания, без существенного увеличения случайной погрешности по сравнению с использованием стандартных оконных функций [13] за счет меньшего увеличения эквивалентной шумовой полосы окна (ЭШП). Кроме того, в отличие от известного в литературе подхода адаптируемых оконных

Была проанализирована осциллирующая методическая погрешность демодуляции, вызванная эффектом спектрального просачивания. Показано, что целесообразным является применение оконных функций для ее снижения, особенно при оценке частот $\omega_{p,\mu}$, как продемонстрировано на рисунке 4. Кроме того,

функций [14] в рамках предложенного метода не требуется пересчет окна при изменении частот полигармонической СПФ в заданном диапазоне измерений. В пункте 3.3.1 сформулированы условия синтеза окна $w^{\text{synt}}(i)$ с Фурье-образом $W^{\text{synt}}(\omega)$ для случая оценки частот ω_1 и ω_2 , и фаз θ_1 и θ_2 бигармонической СПФ интерферометров в виде последовательности S_i ,

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Условие 1: } |W^{\text{synt}}(\omega)| \rightarrow \min \text{ для} \\ \omega \in \pm[\omega_{1m} - \Delta\Omega_1/2; \omega_{1m} + \Delta\Omega_1/2] \cup \pm[2\omega_{1m} - \Delta\Omega_2/2; 2\omega_{1m} + \Delta\Omega_2/2] \cup \\ \cup \pm[\omega_{2m} - \Delta\Omega_3/2; \omega_{2m} + \Delta\Omega_3/2] \cup \pm[2\omega_{2m} - \Delta\Omega_4/2; 2\omega_{2m} + \Delta\Omega_4/2] \cup \\ \cup \pm[\omega_{1m} - \omega_{2m} - \Delta\Omega_5/2; \omega_{1m} - \omega_{2m} + \Delta\Omega_5/2] \cup \\ \cup \pm[\omega_{1m} + \omega_{2m} - \Delta\Omega_6/2; \omega_{1m} + \omega_{2m} + \Delta\Omega_6/2]; \\ \text{Условие 2: } |W^{\text{synt}}(\omega) - W(\omega)| \rightarrow \min \text{ для других } \omega. \end{array} \right. \quad (14)$$

Условие 1 обеспечивает минимизацию паразитных слагаемых, ответственных за спектральное просачивание в выражении (10) в областях максимумов $|V(\omega)|$ искомым частот и фаз, за счет провалов W^{synt} в областях, обоснованных в диссертации. Здесь $W(\omega)$ – образ базового окна, на основе которого производится синтез (в работе использовалось прямоугольное окно), ω_{1m} и ω_{2m} – положения максимумов $|V(\omega)|$, полосы $\Delta\Omega_p$, где $p = \pm 1, \dots, \pm 6$, учитывают возможные изменения частот $\omega_{1,2}$ от изменения разности оптических путей интерференционных компонент в диапазоне измерений интерферометров, а также смещение положений ω_{1m} , ω_{2m} максимумов $|V|$ из-за спектрального просачивания и влияния шумов измерительной аппаратуры. Условие 2 можно трактовать как препятствие увеличению эквивалентной шумовой полосы окна, т.е. увеличению случайной погрешности измерений.

Для формирования провалов W^{synt} был модифицирован известный подход формирования провалов диаграммы направленности антенной решетки из работы [15]. Искомый W^{synt} представляется в виде разности исходного W и компенсирующего W^{comp} Фурье-образов: $W^{\text{synt}} = W - W^{\text{comp}}$. Широкие провалы формируются созданием набора нулей W^{synt} во многих точках ω_k . W^{comp} при этом составляется в виде

$$W^{\text{comp}}(\omega) = \sum_{k=1}^K H_k \cdot G(\omega - \omega_k) \quad (15)$$

Здесь $G(\omega)$ – базисные функции (в работе была задана функция $G = W$), $\{\omega_k\}$ – набор частотных точек, где создаются нули в W^{synt} , $\{H_k\}$ – коэффициенты перед базисными функциями. Для получения W^{synt} , необходимо задать набор $\{\omega_k\}$, тогда коэффициенты $\{H_k\}$ рассчитываются из матричного уравнения $\{H_k\} = [G(\omega - \omega_k)]^{-1} \cdot [W(\omega_k)]$. После расчета этих коэффициентов искомое окно $w^{\text{synt}}(i)$ находится обратным преобразованием Фурье от $W^{\text{synt}}(\omega)$.

В рамках предложенного подхода ключевым является выбор набора $\{\omega_k\}$ для наилучшего соответствия условию (14). Для этого в пункте 3.3.2 была записана целевая функция минимизации, отвечающая условию (14). Затем было предложено использовать генетический алгоритм оптимизации, который хорошо подходит для записанной существенно нелинейной и имеющей множество разрывов целевой функции. Оптимизация была реализована в ПО MATLAB. Оптимизировались положения и количество точек $\{\omega_k\}$. В пунктах 3.3.3 и 3.3.4 проведены численная, в MATLAB, и экспериментальная демонстрации действия предложенного подхода на примере демодуляции СПФ двух мультиплексированных волоконных

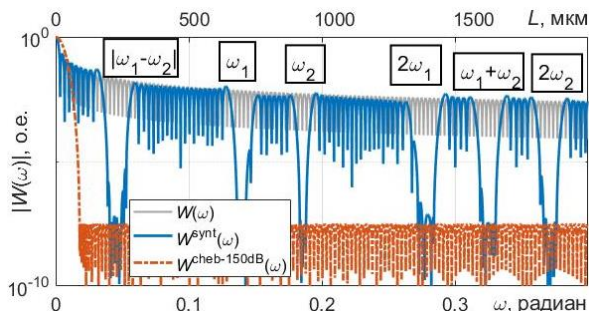


Рисунок 6. Зависимости модулей Фурье-образов $W(\omega)$, $W^{\text{synt}}(\omega)$ и $W^{\text{cheb-150dB}}(\omega)$.

интерферометров Фабри-Перо (ВИФП). Был рассмотрен случай с фиксированным значением зазора ВИФП №1 $L_1 = 664,8$ мкм, и перестройкой зазора ВИФП №2 L_2 от 861 до 906 мкм. Параметры СПФ (в равномерной шкале частот): спектральный диапазон $\Delta f = 9,99$ ТГц (от 1510 до 1590 нм) с центром диапазона сканирования частоты $f_0 = 193,54$ ТГц, шагом по частоте $\Delta f = 5$ ГГц и количеством отсчетов $N = 2000$. Окно w^{synt} синтезировалось так, чтобы учесть диапазон изменения зазора датчиков в 15 мкм (динамический диапазон 10^5 - 10^6). На рисунке 6 представлен график $W^{\text{synt}}(\omega)$. Получены провалы в заданных областях частот. Вне их $W^{\text{synt}}(\omega)$ близка к $W(\omega)$. такие же провалы боковых лепестков можно получить и при помощи окна Дольфа – Чебышева с уровнем боковых лепестков -150 дБ: $w^{\text{cheb-150dB}}(i)$, с Фурье-образом $W^{\text{cheb-150dB}}(\omega)$, ЭШП которого в 1,8 раз больше, чем у w^{synt} . Далее при помощи численного моделирования в MATLAB было показано, что с использованием w^{synt} можно снизить методическую погрешность нахождения ω_1 и ω_2 на пять порядков, относительно применения прямоугольного окна. Такое же снижение можно получить и с окном Дольфа-Чебышева -150 дБ. В пункте 3.3.4 экспериментально продемонстрировано снижение методической погрешности нахождения ω_1 и ω_2 , и θ_1 и θ_2 с использованием w^{synt} .

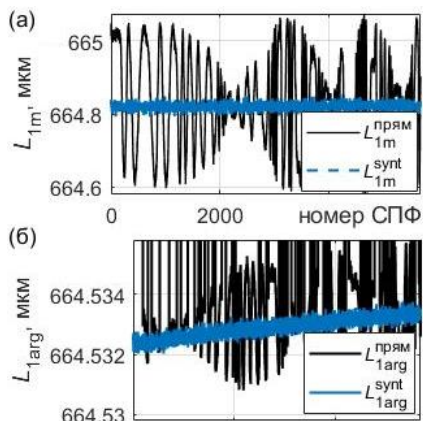


Рисунок 7. Зависимости L_{1m} (а) и L_{1arg} (б) от СПФ к СПФ при изменении L_2 .

сравнению с использованием окна Дольфа – Чебышева; и снижение суммарной погрешности оценки θ_1 : в 7 раз по сравнению с использованием прямоугольного окна и на 10% по сравнению с окном Дольфа – Чебышева.

В четвертом разделе рассматриваются особенности опроса волоконно-оптических интерферометров при помощи спектрометра на основе цифровой камеры смартфона. С точки зрения многопараметрических измерений исследована такая возможность опросного устройства, как одновременное измерение СПФ волоконно-оптических интерферометров и калибровка шкалы длин волн опросного устройства. **В пункте 4.1** приведено общее описание опросного устройства. Его схема и фотография представлены на рисунке 8а и 8б. Излучение белосветного светодиода направляется в световод, проходит через волоконно-оптический интерферометр, и направляется на оптическую щель спектрометра и далее на дифракционную решетку под углом примерно в 60 градусов, после чего первый дифракционный порядок попадает на светочувствительную матрицу, а затем фотографируется. Фотография обрабатывается с использованием данных о калибровке шкалы длин волн, результатом чего является полученная СПФ ВОИ. **В пункте 4.2** рассмотрен опрос многомодовых чирпированных волоконных брэгговских решеток (ВБР) записанных в параболический ММ световод G.651 при помощи интерферометра Тальбота и KrF эксимерной лазерной системы [16]. **В пункте 4.2.1** проведен опрос одиночной ВБР по схеме «на проход» при помощи спектрометра, собранного на основе монохромной 20 Мр камеры Huawei P20Pro и имеющего шаг шкалы длин волн 0,18 нм/пиксель и оптическое разрешение в несколько нм. Полученные СПФ показаны на рисунке 8в.

На рисунке 7а показаны зависимости L_{1m} при изменении L_2 вручную от 906 мкм до 861 мкм, найденных по положению 1-го максимума $|V(\omega)|$ с использованием прямоугольного окна и с использованием w^{synt} , а на рисунке 7б – L_{1arg} , найденные по аргументу $V(\omega)$. Экспериментально

показано, что случайная погрешность измерений при использовании w^{synt} увеличивается незначительно по сравнению с использованием окна Дольфа-Чебышева с оптимальным уровнем боковых лепестков: снижение суммарной погрешности оценки ω_1 : в 13 раз по сравнению с использованием

прямоугольного окна и в 1,5 раза по сравнению с использованием окна Дольфа – Чебышева; и снижение суммарной погрешности оценки θ_1 : в 7 раз по сравнению с использованием

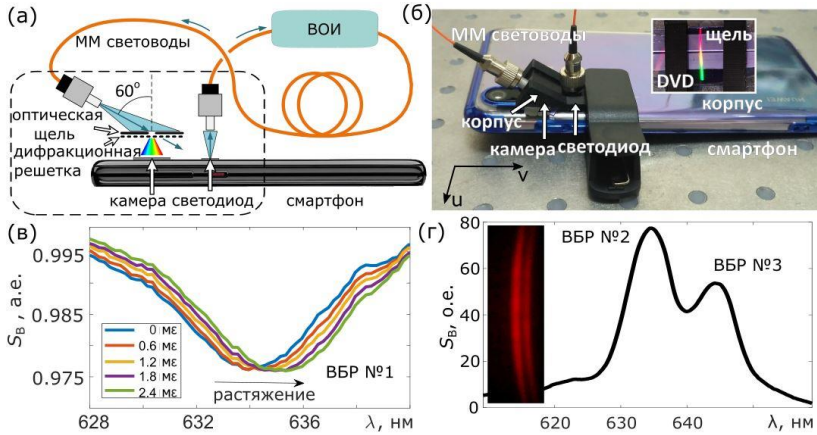


Рисунок 8. Схема спектрометра на основе смартфона (а) и его фото (б). СПФ ВБР для разных значений растяжения ϵ (в). СПФ двух последовательных ВБР (г) и фото спектра света, отраженного от них (вставка);

Среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренной брэгговской длины волны ВБР составило $14 \text{ пм}/\sqrt{\text{Гц}}$ ($0,08 \text{ пикселей}/\sqrt{\text{Гц}}$). **В пункте 4.2.2** проведен опрос двух последовательных ВБР по схеме «на отражение» при помощи спектрометра, собранного на основе RGB 10 Мр камеры смартфона Huawei P20Pro и имеющего шаг шкалы длин волн $0,265 \text{ нм}/\text{пиксель}$ и оптическое разрешение в 6 нм . Полученные СПФ показаны на рисунке 8г. Экспериментально продемонстрировано, что шкала длин волн спектрометра на основе смартфона испытывает заметный дрейф, вызванный нагревом смартфона, порядка $37 \text{ пм}/^\circ\text{C}$. Показана компенсация дрейфа шкалы длин волн посредством изолированной от внешних воздействий калибровочной ВБР при опросе чувствительной ВБР. СКО погрешности калибровки шкалы длин волн составило $29 \text{ пм}/\sqrt{\text{Гц}}$ ($0,11 \text{ пикселей}/\sqrt{\text{Гц}}$).

В пункте 4.3 представлен оригинальный метод калибровки шкалы длин волн спектрометра на основе цифровой RGB-камеры, позволяющий одновременно с калибровкой производить опрос волоконно-оптических интерферометров без необходимости установки дополнительных калибровочных устройств в оптический канал спектрометра. Метод основан на наличии встроенных в камеру смартфона нескольких цветных фильтров: красного, зеленого и синего цветов (RGB). Фотография каждого спектра преобразуется из RGB формата в формат HSV (hue –цветовой тон, saturation – насыщенность, value – яркость). Как видно из рисунка 9, распределение H состоит из основных областей с относительно равномерным распределением цветового тона, соответствующих чистым красному, зеленому и синему цветам, и двух переходных областей где значение тона быстро меняется.

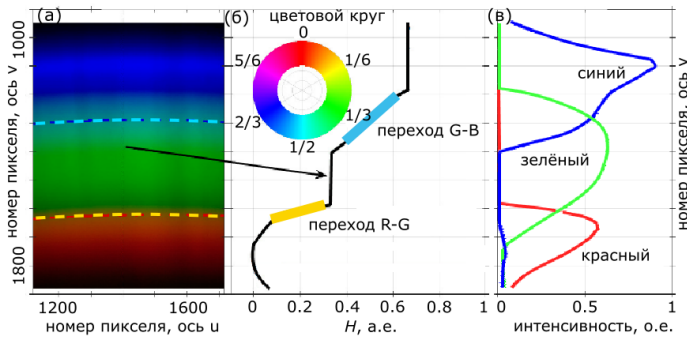


Рисунок 9. Фото спектра светодиода (а). Сечение распределения H этого фото вдоль оси v для $u=1400$ (б). RGB-представление того же поперечного сечения (в).

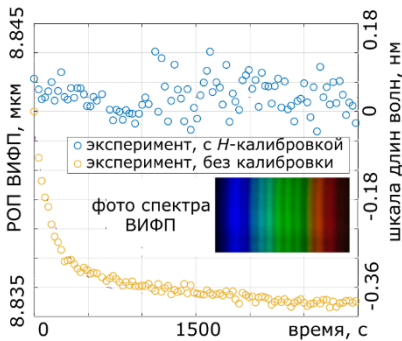


Рисунок 10. Найденные значения РОП ВИФП (соответствующие сдвиги шкалы длин волн показаны второй вертикальной осью) и фото спектра ВИФП (вставка).

компенсация температурного дрейфа шкалы длин волн при изменении температуры смартфона от 33 до 40,5 °C (рисунок 10). Также реализована калибровка шкалы длин волн спектрометра при многократных процедурах снятия-установки оптического модуля на смартфон. СКО погрешности калибровки шкалы длин волн составило 270 пм/ $\sqrt{\Gamma}$ (1,1 пикселя/ $\sqrt{\Gamma}$).

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы работы. **В приложении 1** приведено сравнение выражений для приращений ПР мод световода при равномерном изгибе. **В приложении 2** приведены результаты численного моделирования изогнутого многомодового параболического световода. **В приложении 3** приведена методика оценки дисперсионных характеристик материалов реальных оптических волокон.

Переходные области обусловлены перекрытием спектральных диапазонов RGB фильтров камеры. Подход калибровки шкалы длин волн заключается в контроле положений этих переходных областей для каждой значимой строки u_i

фотографии спектра. В данной работе использован метод аппроксимации участков переходных областей H , близких к линейным, функцией гиперболического тангенса. Для проведения абсолютной калибровки шкалы длин волн спектрометра необходимо только один раз для каждого смартфона сопоставить положения переходных областей H конкретным длинам волн, например, при помощи лазеров или люминесцентной лампы. После этого повторения такого сопоставления не требуются, так как параметры оптических фильтров камеры фиксированы.

В пункте 4.3.2 показана работоспособность метода при опросе ВИФП. Реализована

компенсация температурного дрейфа шкалы длин волн при изменении температуры смартфона от 33 до 40,5 °C (рисунок 10). Также реализована калибровка шкалы длин волн спектрометра при многократных процедурах снятия-установки оптического модуля на смартфон. СКО погрешности калибровки шкалы длин волн составило 270 пм/ $\sqrt{\Gamma}$ (1,1 пикселя/ $\sqrt{\Gamma}$).

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы работы. **В приложении 1** приведено сравнение выражений для приращений ПР мод световода при равномерном изгибе. **В приложении 2** приведены результаты численного моделирования изогнутого многомодового параболического световода. **В приложении 3** приведена методика оценки дисперсионных характеристик материалов реальных оптических волокон.

Список цитируемой литературы

1. **Udd E.** Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists: Second Edition. Fiber Opt. Sensors An Introd. Eng. Sci. Second Ed. / E. Udd, W. B. Spillman. – 2011.
2. **Жаринов Ю. А.** Применение электробезопасных датчиков в системе управления технологическим процессом обессоливания нефти / Ю. А. Жаринов, Ф. Ф. Шамаев // Прикаспийский жур: упр-е и высокие технол. – 2012. – № 4. – С. 18-23.
3. **Кульчин Ю. Н.** Волоконно-оптический интерферометрический акселерометр для мониторинга природных и техногенных объектов / Ю. Н. Кульчин, О. Т. Каменев, Ю. С. Петров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 291-296.
4. **Temkina V.** Research on the Methods and Algorithms Improving the Measurements Precision and Market Competitive Advantages of Fiber Optic Current Sensors / V. Temkina, A. Medvedev, A. Mayzel // Sensors. – 2020. – Vol. 20. – № 21.
5. **Butov O. V.** Optical Fiber Sensor for Deformation Monitoring of Fuel Channels in Industrial Nuclear Reactors / O. V Butov, Y. K. Chamorovskiy, A. P. Bazakutsa [et al.] // 26th Internat. Conf. on Optical Fiber Sensors. Optica Publishing Group, 2018. – P. TuE103.
6. **Королёв В. А.** Волоконно-оптические датчики для внутриполостного применения в медицине / В. А. Королёв, В. Т. Потапов // Вестник новых медицинских технологий. – 2009. – Т. 16. – № 2. – С. 148-150.
7. **Шелемба И. С.** Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Фотон-экспресс. – 2015. – № 6. – P. 194.
8. **Pevec S.** Multiparameter fiber-optic sensors: a review / S. Pevec, D. Donlagić // Optical Engineering. – 2019. – Vol. 58. – № 07. – P. 1.
9. **Kumar A.** Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures / A. Kumar, R. K. Varshney, S. Antony C, P. Sharma // Optics Communications. – 2003. – Vol. 219. – № 1. – P. 215-219.
10. **Ushakov N.** Resolution limits of extrinsic Fabry\–Perot interferometric displacement sensors utilizing wavelength scanning interrogation / N. Ushakov, L. Liokumovich // Appl. Opt. – 2014. – Vol. 53. – № 23. – P. 5092-5099.
11. **McGonigle A. J. S.** Smartphone Spectrometers / A. J. S. McGonigle, T. C. Wilkes, T. D. Pering [et al.] // Sensors. – 2018. – Vol. 18. – № 1.
12. **Karapetyan K.** Optical Fibre Toolbox. MATLAB Central File Exchange. – URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27819-optical-fibre-toolbox> (date accessed: 01.06.2021). – Text : electronic.
13. **Дворкович А.** Оконные функции для гармонического анализа сигналов / А. Дворкович, В. Дворкович. – ЛитРес, 2022.
14. **Давыдочкин В. М.** Весовые функции и алгоритмы для повышения точности оценки частоты и амплитуды выборки гармонического сигнала на фоне сигналоподобных помех. / В. М. Давыдочкин // Автореф.... канд. техн. наук. Рязань: Рязанский гос. радиотехн. ун-т. – 2008. – С. 19.
15. **Козлов Д. С.** Интерференционное формирование диаграммы направленности фазированной антенной решетки с подавлением излучения в заданном направлении с учетом взаимного влияния излучателей / Д. С. Козлов // автореф.... канд. физ.-иат. наук. СПб: ЛЭТИ. – 2016. – С. 18.

16. **Gribaev A. I.** Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer / A. I. Gribaev, I. V Pavlishin, A. M. Stam [et al.] // Optical and Quantum Electronics. – 2016. – Vol. 48. – № 12. – P. 1-7.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

1. **Markvart A. A.** Smartphone-Based Interrogation of a Chirped FBG Strain Sensor Inscribed in a Multimode Fiber / A. A. Markvart, L. B. Liokumovich, I. O. Medvedev, N. A. Ushakov // J. Lightwave Technol. – 2021. – Vol. 39. – № 1. – P. 282-289.

2. **Markvart A.** Continuous Hue-Based Self-Calibration of a Smartphone Spectrometer Applied to Optical Fiber Fabry-Perot Sensor Interrogation / A. Markvart, L. Liokumovich, I. Medvedev, N. Ushakov // Sensors. – 2020. – V. 20. – № 21. 6304

3. **Маркварт А. А.** Анализ поправок к постоянным распространения в изогнутом многомодовом параболическом оптическом волокне / А. А. Маркварт, Л. Б. Ликумович, Н. А. Ушаков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2021. – Т. 14. – № 2. – С. 104-117.

4. **Маркварт А. А.** Волоконно-оптический датчик на основе межмодового интерферометра с одномодовым подключением для одновременного измерения изгиба и растяжения / А. А. Маркварт, Л. Б. Ликумович, Н. А. Ушаков // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – № 23. – С. 44-47.

5. **Markvart A. A.** Interrogation of FBG sensor by a smartphone / A. A. Markvart, L. B. Liokumovich, N. A. Ushakov // Optical Fiber Sensors Conference 2020 Special Edition. – Optica Publishing Group, 2020. – P. T3.94.

6. **Markvart A. A.** Simultaneous measurement of strain and bend with a fiber optic SMS structure / A. A. Markvart, L. B. Liokumovich, N. A. Ushakov // Optical Fiber Sensors Conference 2020 Special Edition. – Optica Publishing Group, 2020. – P. W4.57

7. **Markvart A.** Simultaneous Measurement of Strain and Curvature with a Fiber Optic Singlemode-Multimode-Singlemode Structure / A. Markvart, L. Liokumovich, N. Ushakov // International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. – 2022. – P. 481-486

8. **Маркварт А. А.** Одновременное измерение растяжения и изгиба при помощи волоконно-оптического межмодового интерферометра с одномодовым подключением / А. А. Маркварт, Л. Б. Ликумович, Н. А. Ушаков // Спецвыпуск «Фотон-экспресс-наука 2021». – 2021. – №6 – С. 365-366

9. **Маркварт А. А.** Применение синтеза весовых окон в дискретном преобразовании Фурье для снижения ошибок демодуляции сигналов мультиплексированных волоконно-оптических датчиков / А. А. Маркварт, Л. Б. Ликумович, Н. А. Ушаков // 24-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA-2022», Москва, Россия, доклады. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение. Выпуск: XXIV – РНТОРЭС имени А.С. Попова. – 2022. – С. 177-181.

10. **Маркварт А. А.** Синтез оконных функций для снижения методических ошибок мультиплексированных волоконно-оптических датчиков / А. А. Маркварт, Л. Б. Ликумович, Н. А. Ушаков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2022. – Т. 15. – № 3. – С. 185-200