

На правах рукописи



САХБИЕВ ТИМУР РАФИЛЕВИЧ

**ОПТИЧЕСКИЙ ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР
С ТРЕХЧАСТОТНЫМ СКЕНИРОВАНИЕМ**

Специальность: 05.11.13 –
Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий.

Научный руководитель: доктор технических наук, ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ»

Сахабутдинов Айрат Жавдатович

Официальные оппоненты: **Ростокин Илья Николаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Управление и контроль в технических системах» Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром;
Грачев Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и техника оптической связи» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара.

Защита состоится « 2 » апреля 2021 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.079.09 при КНИТУ-КАИ по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 31/7 (учебное здание №5, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КНИТУ-КАИ. Электронный вариант автореферата размещен на сайте КНИТУ-КАИ (www.kai.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.079.09.

Автореферат разослан « ___ » февраля 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.079.09,
кандидат технических наук



Е. С. Денисов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Волоконно-оптические и интегральные селективные и широкополосные элементы необходимы как для построения телекоммуникационных, так и сенсорных систем. К ним относятся узкополосные оптические фильтры для мультиплексирования сетей связи с частотным разделением каналов и структурирования каналов пассивной оптической сети, волоконные и интегральные брэгговские решетки (от гауссовских до чирпированных) для многосенсорных сетей со спектральным уплотнением каналов. Появились задачи исследования и мощное направление, связанное с исследованием и контролем спектральных свойств кристаллов, используемых в квантовых коммуникациях. Генерация оптических боковых полос с помощью точно контролируемых микроволновых сигналов открывает новые возможности для квантовой обработки информации с твердыми телами, легированными редкоземельными элементами. В частности, можно реализовать спектроскопию высокого разрешения, оптическое прожигание отверстий, электромагнитно-индуцированную прозрачность, манипулирование состоянием и рамановские эхо-сигналы с помощью очень мощных методов анализа в непрерывном, а также в импульсном режиме, которые разрабатываются для сверхпроводящих квантовых схем. Кроме того, оптоволоконные датчики со сверхузкими спектральными характеристиками начали использоваться для контроля спектральных и температурных характеристик плазмы.

Исследованиям оптических векторных анализаторов посвящены труды зарубежных ученых Loayssa A., Sagues M., Yao J., Pan S., Qing T., Xue M., Wang W.T., Li W., Zou X. и др., ведущих исследования в университетах Испании, Канады, Китая, Германии, Японии, Франции и др. Известны разработки российских ученых, в том числе Бурдина В.А., Бурдина А.В., Султанова А.Х., Виноградовой И.Л., Наний О.Е., Глаголева С.Ф., Былиной М.С., Раевского А.С., сотрудников ПГУТИ, УГАТУ, МИФИ, НГУ, МГУ, ИТМО и других. Практически все ведущие фирмы мира, например, Anritsu, Keysight, Luna Sense Tech., Rode&Shwartz, ИРЭ РАН, ПНППК и др. занимаются разработкой оптических векторных анализаторов и их элементов. Особенностью работ представленных авторов, фирм и научно-исследовательских групп, как указывалось выше, является разработка оптических векторных анализаторов на основе классических видов модуляции – амплитудной, фазовой, поляризационной и их специальных разновидностей, например, с использованием многочастотных комб-генераторов или эффектов Мандельштама-Бриллюэна.

В последнее время исключительно активно развивается круг различных телекоммуникационных, сенсорных и обрабатывающих информацию систем, основанных на использовании амплитудно-фазовой модуляции, реализованной

на базе метода Ильина-Морозова. Многие из них представлены в работах научной школы КНИТУ-КАИ (Морозов О.Г., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Кузнецов А.А., Артемьев В.А., Алюшина С.Г., Куприянов В.Г., Денисенко П.Е., Садеев Т.С., Куревин В.В. и др.) и относятся к радиофотонным. Амплитудно-фазовое модуляционное преобразование оптической несущей по методу Ильина-Морозова, характеризуется высоким коэффициентом преобразования несущей в двухчастотное сбалансированное симметричное излучение, высокой спектральной чистотой и возможностью получения разностной частоты, равной частоте модуляции. Показана возможность ее реализации как на тандемном включении амплитудного и фазового модуляторов Маха-Цендера, так и на одиночном амплитудном модуляторе Маха-Цендера, что впервые было показано в работах Ильина Г.И. и Морозова О.Г. в 1987 г. В приложениях оптического векторного анализа данный метод модуляции до настоящего времени не использовался.

Автором были проанализированы все основные методы и принципы, заложенные в конструкцию оптических векторных анализаторов, и как уже было сказано выше, классические подходы к оптическому спектральному анализу очень сложны и используются только в уникальных проектах. Доступные анализаторы спектра не всегда удовлетворяют требованиям по разрешающей способности измерений и получению фазовой информации.

Отмеченные выше обстоятельства определяют актуальность темы и постановку научно-технической задачи разработки способов и средств оптического векторного анализа на основе применения в них амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей, характеризующегося улучшенными параметрами по сравнению с традиционными.

Представляемая работа посвящена решению научно-технической задачи, заключающейся в разработке принципов методов сканирования оптических устройств асимметричным по амплитуде и/или частоте трехчастотным сигналом, которые могут стать измерительной частью оптических векторных анализаторов высокого разрешения. Тематика и содержание работы соответствуют планам научных исследований, выполняемых в КНИТУ-КАИ.

Объект исследования – оптические векторные анализаторы с трехчастотным зондированием.

Предмет исследования – применение методов и средств специальным образом сформированного трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте зондирующего сигнала со сканированием в оптическом векторном анализаторе.

Цель исследования – улучшение метрологических и технико-экономических характеристик оптических векторных анализаторов на основе

применения в них методов и средств специальным образом сформированного трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте зондирующего сигнала со сканированием, позволяющих повысить разрешающую способность измерений, чувствительность и упростить схему обработки полученной информации.

Научная задача исследования – разработка методов измерительного преобразования, анализа и принципов построения оптических векторных анализаторов, использующих с целью улучшения разрешающей способности и чувствительности измерений, упрощения схем обработки полученной информации трехчастотное асимметричное по амплитуде и/или частоте зондирующее излучение со специальным образом выбранными частотами, амплитудами и начальными фазами его компонент, а также обработкой результирующего сигнала радиофотонными методами на огибающих биений между ними.

Решение поставленной научной задачи и достижение цели диссертационной работы проводилось по следующим основным направлениям:

1. Проведение сравнительного анализа существующих и перспективных оптических векторных анализаторов различного типа и их характеристик; выявление резервов для улучшения метрологических и технико-экономических характеристик оптических векторных анализаторов.

2. Исследование взаимодействия асимметричных по амплитуде и/или частоте трехчастотных оптических сканирующих излучений при их прохождении через оптические элементы с заранее неизвестными амплитудными и фазовыми характеристиками; выявление зависимостей выходных параметров детерминированного асимметричного трехчастотного излучения после прохождения его через исследуемое оптическое устройство и установка взаимосвязи параметров входного и выходного излучения со спектральными характеристиками исследуемого оптического устройства; построение математической модели взаимодействия трехчастотных оптических сканирующих излучений с исследуемым оптическим устройством; анализ методических погрешностей предложенного способа.

3. Исследование математической модели трехчастотного сканирования асимметричными по частоте или амплитуде излучениями с исследуемыми оптическими элементами на основе методов численного и имитационного моделирования; проверка основных соотношений математической модели; проведение оценок основных методических погрешностей в зависимости от погрешностей определения отдельных компонент результирующего сигнала; численное и компьютерное моделирование в среде Optiwave System.

4. Разработка практических рекомендаций по проектированию оптических векторных анализаторов на основе трехчастотного сканирования;

разработка схем формирования сканирующих излучений; методик контроля температуры и напряжений смещения рабочей точки модуляторов; их верификация на основе результатов испытаний анализаторов на специально разработанных экспериментальных стендах; внедрение результатов исследований и оценка перспектив их дальнейшего развития на примере мониторинга процесса записи ВБР.

Методы исследования, достоверность и обоснованность. При выполнении работы применялись апробированные методы математической физики, теории электрооптических кристаллов, математические методы моделирования волоконно-оптических и интегральных структур, методы анализа оптико-электронных приемных систем, математические методы радиотонной обработки спектральной информации. Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук; корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов и результатами других авторов. При решении задач использованы современные программные средства, в том числе стандартные пакеты прикладных программ MathCad и Optiwave System.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем.

Выявлены резервы для улучшения метрологических и технико-экономических характеристик оптических векторных анализаторов, основанных на применении в них способов трехчастотного сканирования, позволяющих повысить разрешающую способность измерений, чувствительность и упростить схему обработки полученной информации.

Предложены способы исследования частотных характеристик спектральных элементов по амплитуде и фазе на основе применения асимметричного по амплитуде и/или частоте трехчастотного сканирующего излучения, позволяющие с более высокой точностью получать информацию о частотных характеристиках спектральных элементов, за счет повышения разрешающей способности и чувствительности измерений, упрощения схем обработки полученной информации и обработке сигнала на огибающих биений между частотными компонентами. Рассмотрены методы исследования спектральных характеристик оптических устройств с заранее неизвестными амплитудно-фазовыми характеристиками на базе симметричного и асимметричного двухчастотного излучения, которой является частным случаем трехчастотного перестраиваемого излучения.

Предложен метод двухэтапной перестройки сканирующего излучения, первый этап которого состоит в грубой перестройке центральной частоты лазерного излучения за счет возможностей и характеристик перестраиваемого

лазерного источника. Второй этап заключается в точной перестройке излучения в каждой точке за счет амплитудно-фазового модуляционного преобразования перестройки частоты в узком частотном диапазоне. Предложены два способа амплитудно-фазового модуляционного преобразования частотной несущей, первый из которых основан на модуляционном преобразовании по методу Ильина-Морозова с последующей фильтрацией одной из боковых компонент. Второй метод основан на формировании одночастотного перестраиваемого излучения в трехкольцевом резонаторе Саньяка с использованием двух двухпортовых однонаправленных фазовых модуляторов.

На основе предложенных способов разработаны научно-технические основы проектирования оптических векторных анализаторов на основе трехчастотного сканирования, возможность универсализации элементной базы, структуры специальных стендов для калибровки и исследования оптических векторных анализаторов, алгоритмическое обеспечение процесса измерений.

Практическая ценность работы заключается в разработке практических рекомендаций по проектированию оптических векторных анализаторов, основанных на применении в них трехчастотного асимметричного по амплитуде или частоте сигнала, включая модельный ряд модуляционных формирователей зондирующего излучения, математическую основу и программное обеспечение для обработки информации; специальные экспериментальные стенды для калибровки и контроля узлов векторных анализаторов. При этом достигается значительная экономия ресурсов на создание оптических векторных анализаторов за счет снижения числа дополнительно вводимых в векторный анализатор устройств, формирующих перестраиваемое зондирующее излучение, и универсализации их элементной базы.

Реализация и внедрение результатов работы представлены в рамках выполнения НИР и НИОКР КНИТУ-КАИ, в частности, в рамках работ по государственному заданию Минобрнауки РФ на выполнение НИР в КНИТУ-КАИ на 2014-2019 годы в проектной (программы «Симметрия», «Фотоника», «Радиофотоника») и базовых частях (программа «Асимметрия»), инициативных работ с ООО «Комас» (НИЦ 118) и АО «НПО «Каскад», а также в учебном процессе КНИТУ-КАИ по направлению «Радиотехника» (профиль «Радиофотоника») и «Инфокоммуникационные системы и технологии» (профиль «Фиксированные сети связи широкополосного доступа»), что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на I и II международных симпозиумах «Телекоммуникации: теория и технологии» в рамках XIV и XV МНТК «Оптические технологии в телекоммуникациях» (г. Самара, 2016 г., г. Казань,

2017 г.), 19-й и 21-й Всероссийской молодежной научной школе-семинаре «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (г. Ульяновск, 2016-2017 гг.), Научно-технической конференции «Актуальные вопросы телекоммуникаций» (г. Самара, 2017 г.), III и IV МНТК молодых ученых, аспирантов и студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы» (г. Казань, 2017-2018 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы более 20 научных работ, основными из которых следует считать 15 работ, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по специальности 05.11.13, 2 статьи в журналах, включенных в базы данных Scopus/WoS, 4 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по смежным специальностям, 7 работ в материалах докладов международных и всероссийских конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 99 наименований, и приложения. Работа без приложения изложена на 183 страницах машинописного текста, включая 61 рисунок, 3 таблицы и 115 формул.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» по пунктам:

1. «Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий» (впервые разработаны, испытаны и внедрены системы формирования сканирующего трехчастотного излучения для оптических векторных анализаторов с симметрией и асимметрией по частоте и/или амплитуде с лучшими метрологическими и технико-экономическими характеристиками).

2. «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» (впервые разработаны методы расчета и проектирования оптических векторных анализаторов с на основе трехчастотного асимметричного по частоте и/или амплитуде сигнала с сверхмалыми разностными частотами, обладающие лучшими метрологическими характеристиками).

6. «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля» (разработаны алгоритмы измерительного преобразования взаимодействия трехчастотного лазерного излучения с исследуемым оптическим устройством и

выведены основные соотношения математической модели, позволяющие определить амплитудную и фазовую характеристику исследуемого оптического устройства в точке сканирования).

Основные положения, выносимые на защиту:

– методы и средства улучшения метрологических и технико-экономических характеристик оптических векторных анализаторов, полученные в результате системного анализа существующего состояния средств указанного класса, отличающиеся от известных применением специальным образом сформированных трехчастотных асимметричных по амплитуде и/или частоте зондирующих сигналов со сканированием.

– математическая модель, описывающая измерительное преобразование в оптическом векторном анализаторе со специальным трехчастотным сканированием, позволяющая получить описание его цифрового двойника, и методы восстановления амплитудных и фазовых характеристик контролируемых спектральных элементов с абсолютной погрешностью измерений, не превышающей 10^{-4} от полной шкалы измерений.

– имитационные модели, реализованные в виде комплекса алгоритмов в среде MathCad и в специальной программной среде OptiSystem 7.0, оптического векторного анализатора со специальным трехчастотным сканированием, подтвердившая предсказания математической модели и позволившая создать базу для проектирования устройств указанного класса;

– практические рекомендации по проектированию оптических векторных анализаторов указанного класса, включающие в себя разработку структур оптических векторных анализаторов, методов формирования излучений, методов перестройки их по частоте и определения основных методических погрешностей, отличающиеся тем, что их внедрение позволит универсализировать элементную базу, снизить техническую сложность реализации и упростить процесс калибровки;

– результаты внедрения и использования разработанных автором теоретических положений, созданных макетов и стендов.

Личный вклад автора заключается в научно-техническом обосновании разработки оптических векторных анализаторов на основе применения в них трехчастотного асимметрично по частоте и/или амплитуде сканирующего сигнала; в разработке способов опроса частотных характеристик спектральных элементов по амплитуде и фазе; в разработке особенностей построения и калибровки каналов измерений; участии в опытной эксплуатации стендов и макетов и проведении оценки эффективности применения анализаторов; определении направлений развития научных исследований по указанной тематике; в апробации, опубликовании и внедрении результатов исследования.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, определены ее актуальность, цель, поставлены задачи исследований, определена научная новизна и практическая значимость, изложены методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, приведены апробация и публикации, основные защищаемые положения, дана структура и краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен сравнительный анализ существующих и перспективных оптических векторных анализаторов на базе излучений симметричного типа, их характеристик, а также причин, сдерживающих их развитие; выявлены резервы для улучшения метрологических и технико-экономических характеристик анализаторов указанного типа, основанные на применении в них способов и средств амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей.

Представлены основы построения оптических векторных анализаторов, построенных на принципах оптической однополосной модуляции с линейным переносом оптического спектра в электрическую область и возможностью достижения пико метровых разрешений, а также определены причины их ограниченного применения, которые можно объяснить следующим образом. Для реализации ОВА на основе оптической однополосной модуляции ключевым моментом является реализация широкополосной и сверхвысококачественной модуляции. Известны многочисленные методы реализации ОВА на базе оптической однополосной модуляции, при этом не удается добиться широкополосной и перестраиваемой по частоте модуляции. Например, для выполнения оптической однополосной модуляции может использоваться двухпортовый модулятор Маха-Цендера, но для данной конфигурации всегда требуется электрический гибридный адаптер для введения фазового $\pi/2$ -сдвига между модулирующими сигналами, вводимыми в два порта модулятора. Поскольку полоса пропускания гибридного соединителя обычно ограничена, будет ограничена и полоса пропускания ОВА.

Исследованы ОВА, работающие на принципах оптической двухчастотной модуляции. В них исключена проблема не до конца подавленной одной из боковых компонент первого порядка, присущей для оптической одночастотной модуляции. Оптические векторные анализаторы на принципах оптической двухчастотной модуляции, обладают рядом преимуществ относительно одночастотной модуляции, которые заключаются в расширении спектрального диапазона сканирования в два раза, расширении динамического диапазона и повышении разрешающей способности сканирования за счет использования двух боковых составляющих снижается и время сканирования. Вместе с тем,

сохраняется и ряд недостатков, присущих ОВА на методах оптической однополосной модуляции, такие, необходимость проведения измерений на динамически перестраиваемой частоте, необходимость применения оптических фильтров, сложных исполнений модуляторов Маха-Цендера и пр.

Автору не удалось найти работ по структуре ОВА, использующих амплитудно-фазовую модуляцию, основанную на асимметричных по амплитуде и/или частоте трехчастотных сканирующих излучениях, которые могут быть перестроены по частоте в широком частотном диапазоне с сохранением взаимного отношения начальных фаз и амплитуд излучения и с сохранением разностных частот, величина которых не превышает заданную разрешающую способность сканирования.

На основе исследований, проведенных в первой главе, сформулированы: объект, предмет, цель, научная задача; определены направления дальнейших исследований для достижения цели и решения научной задачи работы.

Во второй главе предложена математическая модель взаимодействия трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте излучения с исследуемым оптическим устройством. Сформулированы математические закономерности изменения характеристик двух- и трехчастотного симметричного и асимметричного излучения при их прохождении через исследуемое оптическое устройство. Выведены формулы восстановления спектральных (амплитудных и фазовых) характеристик оптического устройства на основе анализа характеристик исходного и прошедшего через оптическое устройство излучений.

В *первом и втором разделах* второй главы решена задача восстановления амплитудно-частотной (раздел 2.1) и фазово-частотной (раздел 2.2) характеристик исследуемого оптического устройства в точке сканирования в зависимости от известных параметров перекрестного биения прошедшего через исследуемое оптическое устройство сканирующего асимметричного трехчастотного излучения. Выведены основные математические зависимости и соотношения. Сформулирован критерий попадания сканирующего излучения в частотный диапазон оптического отклика исследуемого оптического устройства.

На рисунке 1 приведена схема взаимодействия трехчастотного лазерного излучения с исследуемым оптическим устройством. Пунктирной линией показана амплитудно-частотная характеристика исследуемого оптического устройства, A – максимальная амплитуда исходного сигнала; L , C и R – амплитуды (левой, центральной и правой частот) трехчастотного лазерного излучения, прошедшие через оптическое устройство; коэффициенты C_{0L} , C_{0C} , C_{0R} определяют известное взаимное отношение амплитуд исходного излучения; коэффициенты $C_L(\omega)$, $C_C(\omega)$ и $C_R(\omega)$ определяют коэффициенты взаимного отношения величин

амплитуд трехчастотного лазерного излучения после его прохождения через оптическое устройство: $\omega - \Omega_L$, ω , $\omega + \Omega_R$ – частоты (левой, центральной и правой составляющих) трехчастотного лазерного излучения, соответственно.

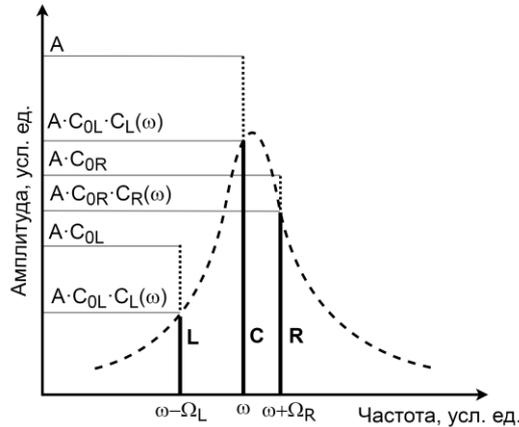


Рисунок 1 – Амплитудно-частотная характеристика исследуемого оптического устройства, при взаимодействии с трехчастотным сканирующим излучением

В условиях математической модели предполагается, что зондирующее излучение представляет собой три непрерывных сверх узких лазерных излучения, спектральной шириной линии которых по отношению к разностным частотам излучения, спектральной ширине сканируемого интервала и к добротности исследуемого оптического устройства можно пренебречь. Тогда каждую составляющую трехчастотного излучения можно описать в виде:

$$\begin{aligned} A_L(t) &= AC_{0L} C_L(\omega) e^{i((\omega - \Omega_L)t + \varphi_{0L}(t) + \varphi(\omega - \Omega_L))} \\ A_C(t) &= AC_{0C} C_C(\omega) e^{i(\omega t + \varphi_{0C}(t) + \varphi(\omega))} \\ A_R(t) &= AC_{0R} C_R(\omega) e^{i((\omega + \Omega_R)t + \varphi_{0R}(t) + \varphi(\omega + \Omega_R))} \end{aligned} \quad (1)$$

Сумма колебаний на близких частотах формирует на фотоприемнике колебание биений, которое влияет на интенсивность выходного тока фотоприемника, зависящее от амплитуд, разностных частот и начальных фаз трехчастотного сигнала, прошедшего через оптическое устройство, и полученной при прохождении фазовой задержки:

$$\begin{aligned} P(t, \omega) &= L^2(\omega) + C^2(\omega) + R^2(\omega) + \\ &+ 2C(\omega)L(\omega)\cos(\Omega_L t + \varphi_{0C}(t) - \varphi_{0L}(t) + \varphi(\omega) - \varphi(\omega - \Omega_L)) + \\ &+ 2R(\omega)C(\omega)\cos(\Omega_R t + \varphi_{0R}(t) - \varphi_{0C}(t) + \varphi(\omega + \Omega_R) - \varphi(\omega)) + \\ &+ 2R(\omega)L(\omega)\cos\left(\begin{aligned} &(\Omega_R + \Omega_L)t + \varphi_{0R}(t) - \varphi_{0L}(t) + \\ &+ \varphi(\omega + \Omega_R) - \varphi(\omega - \Omega_L) \end{aligned}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Колебание интенсивности мощности выходного тока фотоприемника представляет собой суперпозицию постоянного уровня мощности и суммы

колебаний на разностных частотах сканирующего излучения Ω_L , Ω_R , и $\Omega_L + \Omega_R$. Используя радиотонные принципы измерительного преобразования, можно отфильтровать выходной ток фотоприемника, получив амплитуду постоянного уровня сигнала и амплитуды на разностных частотах сканирующего излучения Ω_L , Ω_R , и $\Omega_L + \Omega_R$. Что дает систему из четырех нелинейных уравнений для определения амплитуд сканирующего излучения после его прохождения через оптическое устройство:

$$\begin{cases} D_0 = L^2(\omega) + C^2(\omega) + R^2(\omega) \\ D_L = 2 \cdot C(\omega) \cdot L(\omega) \\ D_R = 2 \cdot R(\omega) \cdot C(\omega) \\ D_C = 2 \cdot R(\omega) \cdot L(\omega) \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку система (3) переопределена (количество уравнений превосходит количество неизвестных), решение такой системы уравнений можно найти методом наименьших квадратов, потребовав минимум функционала Лагранжа, построенного в виде:

$$\begin{aligned} \Phi(L, C, R) = & (L^2 + C^2 + R^2 - D_0)^2 + \\ & + (2 \cdot C \cdot L - D_L)^2 + (2 \cdot R \cdot C - D_R)^2 + (2 \cdot R \cdot L - D_C)^2 \rightarrow \min \end{aligned} \quad (4)$$

Линейная комбинация уравнений (3) позволяет сформулировать критерий попадания трехчастотного сканирующего излучения в частотный диапазон светового отклика исследуемого контура:

$$\frac{D_0(\omega)}{D_C(\omega)} = \frac{1}{2} \left(\frac{L(\omega)}{R(\omega)} + \frac{C^2(\omega)}{L(\omega)R(\omega)} + \frac{R(\omega)}{L(\omega)} \right) \cong \text{const} . \quad (5)$$

Можно ввести дополнительное условие, которое позволяет значительно упростить определение амплитуды на частоте сканирования. Это условие заключается в том, чтобы разностная частота между левой и правой гармониками $\Omega_L + \Omega_R$ трехчастотного излучения была меньше требуемой разрешающей способности сканирования. Выдвинутое требование означает, что взаимное отношение амплитуд сигнала до прохождения исследуемого оптического устройства будет сохранено и после прохождения сигнала через исследуемое оптическое устройство. В условиях выдвинутого дополнительного условия, выражение для результирующей амплитуды упростится:

$$A(\omega) = \begin{cases} \sqrt{\frac{D_L(\omega) \cdot D_R(\omega)}{2 \cdot D_C(\omega)}}, & |D_C(\omega)| > \varepsilon_0 \\ 0, & |D_C(\omega)| \leq \varepsilon_0 \end{cases} \quad (6)$$

где ε_0 – заранее заданная минимально допустимая величина уровня сигнала.

Простейший способ восстановления фазово-частотной характеристики заключается в анализе результата интерференции направленного на оптическое устройство и прошедшего через него излучений. Объединив исходный и прошедший сигналы на фотоприемнике, и определив постоянный уровень мощности сигнала в каждой точке сканирования, получаем возможность определения фазово-частотной характеристики оптического устройства при известных значениях амплитудно-частотной характеристики и амплитуды исходного сканирующего излучения.

Как и в случае восстановления амплитудно-частотной характеристики, воспользуемся фильтрацией сигнала на известных разностных частотах. Определим постоянный уровень сигнала, потребовав выполнение выдвинутого выше дополнительного условия. Тогда соотношения для восстановления фазово-частотной характеристики контура значительно упростятся, и получим систему уравнений для определения фазовой задержки ψ в точке сканирования:

$$\left\{ \begin{array}{l} D(\omega, t)|_0 = L^2 + l^2 + C^2 + c^2 + R^2 + r^2 + 2(Ll + Cc + Rr)\cos(\psi) \\ \left(D(\omega, t)|_{\Omega_L} / 2 \right)^2 = (CL + Cl\cos(\psi) + cL\cos(\psi) + cl)^2 + (Cl\sin(\psi) - cL\sin(\psi))^2 \\ \left(D(\omega, t)|_{\Omega_R} / 2 \right)^2 = (RC + Rcc\cos(\psi) + rC\cos(\psi) + rc)^2 + (Rc\sin(\psi) - rC\sin(\psi))^2 \\ \left(D(\omega, t)|_{\Omega_L + \Omega_R} / 2 \right)^2 = (RL + Rl\cos(\psi) + rL\cos(\psi) + rl)^2 + (Rl\sin(\psi) - rL\sin(\psi))^2 \end{array} \right. \quad (7)$$

Система уравнений (7) переопределена, поскольку для нахождения одной неизвестной ψ имеем четыре уравнения. Решение получим методом минимизации функционала Лагранжа, что дает одно алгебраическое уравнение третьего порядка относительно косинуса фазовой задержки $x = \cos(\psi)$:

$$\begin{aligned} & \left(L^2 + l^2 + C^2 + c^2 + R^2 + r^2 + 2(Ll + Cc + Rr)x - D(\omega, t)|_0 \right) (Ll + Cc + Rr) + \\ & + \left((CL + cl)^2 + 2(CL + cl)(Cl + cL)x + 4ClcLx^2 + (Cl - cL)^2 - \left(D(\omega, t)|_{\Omega_L} / 2 \right)^2 \right) \times \\ & \times \left((CL + cl)(Cl + cL) + 4ClcLx \right) + \\ & + \left((RC + rc)^2 + 2(RC + rc)(Rc + rC)x + 4RcrCx^2 + (Rc - rC)^2 - \left(D(\omega, t)|_{\Omega_R} / 2 \right)^2 \right) \times \\ & \times \left((RC + rc)(Rc + rC) + 4RcrCx \right) + \\ & + \left((RL + rl)^2 + 2(RL + rl)(Rl + rL)x + 4Rlrlx^2 + (Rl - rL)^2 - \left(D(\omega, t)|_{\Omega_L + \Omega_R} / 2 \right)^2 \right) \times \\ & \times \left((RL + rl)(Rl + rL) + 4Rlrlx \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Решение, которого можно уже получить с помощью формулы Кардано для корней кубического уравнения.

В *третьем разделе* второй главы приведены результаты исследований отдельных частных случаев взаимодействия асимметричного излучения с исследуемым оптическим устройством. В частности, исследованы случаи двухчастотного, трехчастотного с симметрией частот сигналом и сканирование оптического устройства с гауссовой формой профиля симметричным трехча-

стотным излучением. Выведены формулы зависимости спектральной характеристики для каждого из частных случаев в отдельности.

В *четвертом разделе* второй главы решена задача влияния погрешности измерений на восстановление амплитудных и фазовых характеристик.

В работе сформулировано требование о согласованности начальных фаз исходных частотных компонент трехчастотного излучения, которое обеспечивает отсутствие влияния фазовых шумов – *оптический трехчастотный сигнал должен быть сформирован так, чтобы обеспечить согласованность начальных фаз на несущих частотах во времени.*

Влияние точности измерения параметров выходного тока на точность восстановления спектральных характеристик, можно вывести, введя погрешность измерений ε , для которой справедливо требования ее малости по отношению к измеренным амплитудам. Проведя простейшие алгебраические преобразования, получим выражение для погрешности определения амплитудной характеристики:

$$Err(\omega) = \left| 1 - \frac{\sqrt{1 + \varepsilon \frac{D_L(\omega) + D_R(\omega)}{D_L(\omega)D_R(\omega)} + \frac{\varepsilon^2}{D_L(\omega) \cdot D_R(\omega)}}}{1 + \frac{\varepsilon}{D_C(\omega)}} \right| \quad (9)$$

В работе произведена оценка абсолютных значений погрешности измерений амплитуды, которая не превышает 10^{-4} от амплитуды сигнала.

В *пятом разделе* второй главы приведены основные выводы и заключения по главе.

В третьей главе изложены результаты исследований методов формирования сканирующих излучений, и их перестройке по частоте. Сформулированы требования к построению сканирующих оптико-электронных схем. Приведены результаты численного и компьютерного моделирования. Различия в терминологии численного и компьютерного моделирования введено специально, чтобы подчеркнуть различия между численным моделированием, которое проведено на основе численного анализа математических соотношений и уравнений математической модели, и компьютерным имитационным моделированием, которое выполнено в программном пакете OptiSystem.

В *первом разделе* главы 3 приведены результаты исследований методов формирования асимметричных трехчастотных сканирующих излучений. Акцент сделан на формировании трехчастотных сигналов рекомендации к характеристикам, которых были сформулированы во второй главе на основе исследования основных соотношений математической модели. Предложены методы формирования сверхузких по разностным частотам двух- и трехчастотных излучений (рис. 2).

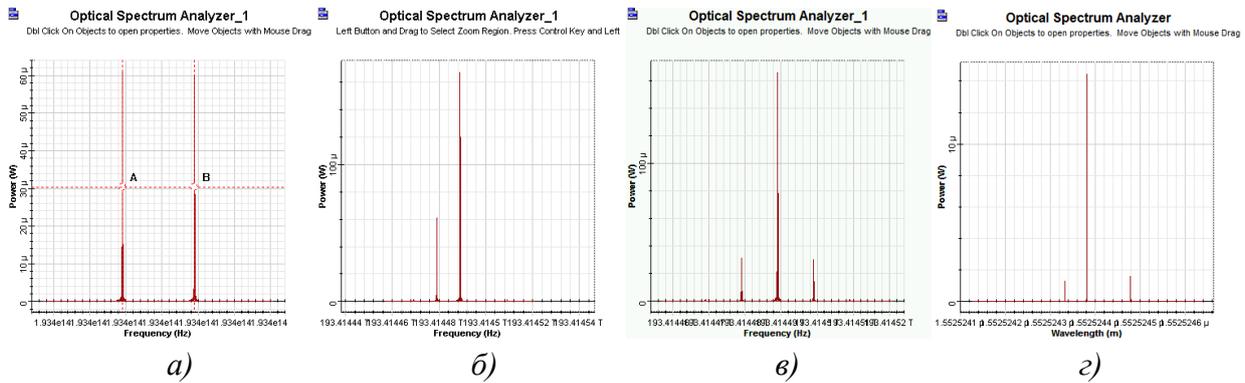


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика сканирующего сигнала:
 а) двухчастотного симметричного; б) двухчастотного асимметричного;
 в) трехчастотного симметричного; г) трехчастотного асимметричного
 по частоте и амплитуде

Показана возможность удовлетворения требованиям метода и обеспечения заданной разрешающей способности, когда разностные частоты сформированных сканирующих излучений не превышают требуемую разрешающую способность восстановления спектральных характеристик. Предложены методы формирования двухчастотного симметричного, асимметричного (по амплитуде), трехчастотного симметричного и асимметричного излучений, формирование которых осуществляется путем амплитудно-фазового модуляционного преобразования на двухпортовом и параллельном двухпортовом модуляторах Маха-Цендера.

На основе анализа зависимости выходных сигналов модулятора Маха-Цендера от выбранных параметров модуляции, показано, что формирование того или иного вида сканирующего излучения зависит от выбора параметров модуляции, которое, к примеру, для трехчастотного симметричного сигнала имеет вид:

$$E_{\text{out}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left\{ \begin{aligned} &0.62 \sin(\omega t) + 0.522(-\cos((\omega - \Omega)t) + \cos((\omega + \Omega)t)) + \\ &+ 0.183(\sin((\omega - 2\Omega)t) + \sin((\omega + 2\Omega)t)) \end{aligned} \right\} \quad (\text{П.10})$$

Начальные фазы всех типов формируемых сканирующих излучений взаимно согласованы, что обеспечивает отсутствие влияния фазового шума на результаты измерений.

Во *втором разделе* главы предложены методы точной перестройки центральной частоты исходного излучения в узком частотном диапазоне. Первый из предложенных методов основан на принципе двухчастотной амплитудно-фазовой модуляции по методу Ильина-Морозова. Второй предложенный метод формирования перестраиваемого одночастотного излучения основан на оптико-электронной схеме, построенной на основе интерферометра Саньяка (рис. 3),

который представляет собой три кольцевых резонатора, два направленных двухпортовых фазовых модулятора и фазовые задержители.

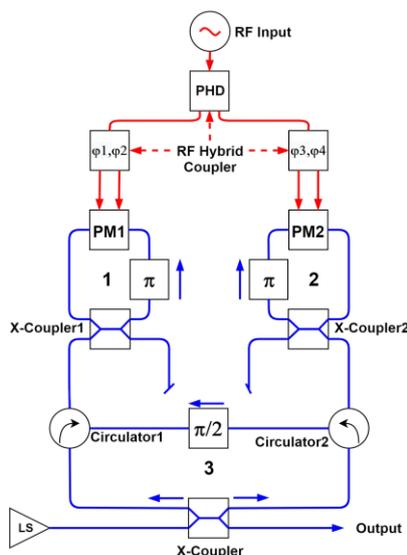


Рисунок 3 – Оптико-электронная схема формирования одночастотного излучения с перестройкой центральной частоты в узком частотном диапазоне на базе кольцевых резонаторов и фазовых модуляторов

Выбор параметров фазовых задержек в портах фазовых модуляторов и коэффициента модуляции позволяет сформировать амплитудно-фазовый модулированный сигнал, в спектре которого несущая частота подавлена и присутствует лишь одна боковая спектральная компонента первого порядка. Остальные спектральные компоненты высших порядков подавлены более чем на 30 дБ. Перестройка центральной частоты боковой компоненты, как и в первом варианте, осуществляется управлением частотой модулированного сигнала, что также позволяет перестраивать частоту с любым наперед заданным шагом, вплоть до единиц герц.

В *третьем разделе* главы приведены результаты численного исследования математической модели. Целью исследования являлось подтверждение корректности выдвинутых предположений, достоверности и продуктивности гипотез о взаимном влиянии параметров задачи на результаты измерений. Исследованы три различных случая сканирования оптического устройства: двухчастотным симметричным, трехчастотным асимметричным по разностным частотам и симметричным по амплитуде, трехчастотным симметричным по разностным частотам и асимметричным по амплитуде излучениями. В качестве модели исследуемого оптического устройства был выбран резонансный контур с формой профиля, подчиняющейся закону нормального распределения с шумовой составляющей. По амплитудам колебаний на разностных частотах с

учетом выведенных соотношений математической модели определялись параметры взаимного отношения характеристик сканирующего излучения прошедшего через оптическое устройство и восстанавливались характеристики исследуемого оптического устройства. На рисунке 4 приведена восстановленная форма исследуемого резонансного контура методом трехчастотного сканирования с равным распределением частот и асимметричными амплитудами: кривой с маркерами показана восстановленная форма профиля; тонкая линия относительная погрешность определения формы контура.

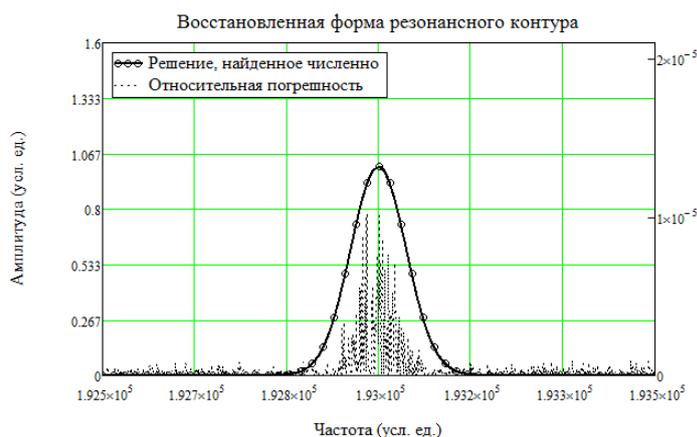


Рисунок 4 – Восстановленная форма резонансного контура методом трехчастотного сканирования с равным распределением частот и асимметричными амплитудами

Определены ошибки и погрешности измерений по оценке которых сделаны выводы о том, что предложенный метод отвечает современным требованиям, предъявляемым к оптическому векторному анализу.

В четвертом разделе главы приведены результаты имитационного моделирования в специализированном профессиональном программном пакете OptiSystem. Имитационное моделирование проводилось целью верификации основных соотношений математической модели и предложенных оптико-электронных схем. Рассмотрены оптико-электронные схемы двух- и трехчастотного сканирования. Сравнивались амплитудно-частотные характеристики исследуемого оптического устройства (волоконной брэгговской решетки) и ее восстановленная амплитудно-частотная характеристика. На основе сравнений были подтверждены корректность выдвинутых теоретических предсказаний и результаты численного моделирования.

В пятом разделе сформулированы основные выводы по главе.

В четвертой главе предложены практические рекомендации по проектированию оптических векторных анализаторов симметричного типа на основе амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей.

Даны рекомендации по подбору элементной базы, приведена оптико-электронная схема реализованной экспериментальной установки, приведена сама экспериментальная установка и примеры ее работы. Приведены результаты верификации на основе сравнения спектральных характеристик исследуемых резонансных контуров, полученных на экспериментальной установке и на промышленных лабораторных приборах. Приведены внедрения результатов исследовательской работы и осуществлена оценка перспектив их дальнейшего развития. Были оценены и подтверждены результаты других авторов, в которых указывалось, что использование оптических векторных анализаторов может потенциально позволить исследовать характеристики оптических устройств с любой разрешающей способностью.

В *первом разделе* главы даны практические рекомендации к выбору перестраиваемого лазерного источника, технические характеристики которого позволяют осуществлять грубую перестройку частоты его излучения в широком спектральном диапазоне.

Во *втором разделе* главы приведены практические рекомендации к выбору оптико-электронной элементной базы оптического векторного анализатора. Даны рекомендации по выбору электрооптических, фазовых, поляризационных модуляторов, перестраиваемых фильтров, модуляторов Маха-Цендера, двойных параллельных модуляторов Маха-Цендера, и фотоприемников.

В *третьем разделе* главы приведена реализованная оптико-электронная схема оптического векторного анализатора. В НИИ ПРЭФЖС, КНИТУ-КАИ при участии автора была разработана оптико-электронная схема ОВА, использующая одночастотный перестраиваемый лазерный источник, модулятор Маха-Цендера для тонкой перестройки центральной частоты лазера в каждой точке перестройки его собственной частоты, оптический перестраиваемый фильтр, отсекающий несущую и одну из боковых частот, двухпортовый параллельный модулятор Маха-Цендера, оптический циркулятор и фотоприемник. После фотоприемника происходит фильтрация результирующего электрического сигнала на разностных частотах трехчастотного асимметричного излучения. Разработанная оптико-электронная схема приведена на рисунке 5. На рисунке 5 использованы обозначения: 1-LS – перестраиваемый лазерный источник; 2-MMZ – ММЦ тонкой перестройки центральной частоты; 3-FF – перестраиваемый частотный оптический фильтр; 4-DPPMMZ – двухпортовый параллельный ММЦ; 5 – оптический циркулятор; 6-ОЕ – исследуемое ОУ; 7 – фотоприемник; 9 – частотные фильтры настроенные на разностные частоты излучения; 10 – модули АЦП; 11-СВ – блок компьютерной обработки сигнала.

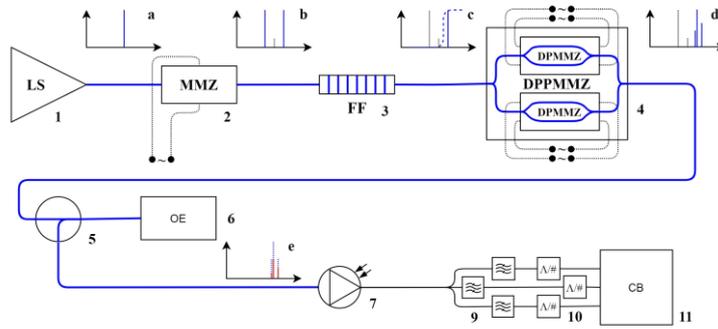


Рисунок 5 – Оптико-электронная схема ОВА

Модулятор Маха-Цендера тонкой перестройки центральной частоты и перестраиваемый частотный оптический фильтр могут быть заменены схемой генерации одночастотного перестраиваемого излучения. В данной работе это сделано не было. Конкретная реализация оптико-электронной схемы была выбрана исходя из имеющейся в наличии элементной базы.

В четвертом разделе главы приведена разработанная экспериментальная установка, основанная на перестраиваемом с грубым шагом источнике узкополосного лазерного излучения. На рисунке 6 приведена экспериментальная установка, которая использовалась для построения спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток.

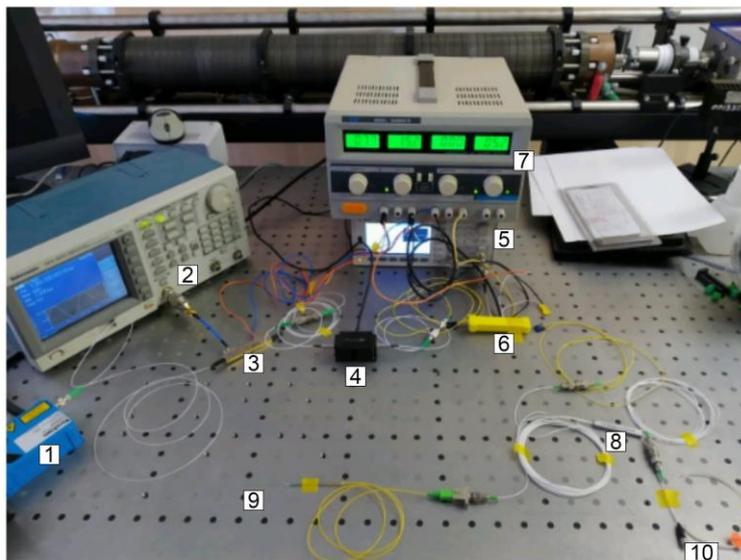


Рисунок 6 – Фотография экспериментальной установки, собранной НИИ ПРЭФЖС, КНИТУ-КАИ при участии автора

На рисунке 6 цифрами обозначены: 1– источник оптического излучения; 2 – генератор тонкой перестройки для ММЦ-1; 3 – ММЦ-1 тонкой перестройки

центральной частоты; 4 – перестраиваемый частотный оптический фильтр; 5 – генератор для двухпортового параллельного ММЦ-2; 6 – двухпортовый параллельный ММЦ-2; 7 – устройство задания рабочей точки модуляторов; 8 – оптический циркулятор; 9 – исследуемое ОУ; 10 – фотоприемник.

Точная перестройка осуществлялась на модуляторе Маха-Цендера с формированием перестраиваемого излучения по методу Ильина-Морозова. Трехчастотный сигнал формировался на двухпортовом модуляторе Маха-Цендера. Прием результирующего излучения проводился на фотоприемнике с последующей оцифровкой и обработкой сигнала на компьютере. Фильтрация сигнала на разностных частотах производилась математически, после приема и оцифровки сигнала на компьютере. Контроль положения лазера осуществлялся по каналу обратной связи контроля центральной частоты, встроенного в лазер.

Перестройка центральной частоты лазера синхронизирована с перестройкой центральной частоты селективного частотного фильтра, который подавлял несущую частоту и все боковые частоты излучения после модулятора Маха-Цендера, использовавшегося для тонкой перестройки частоты излучения. Положение частоты излучения тонкой перестройки контролировалось частотой модуляции, прилагаемой к модулятору Маха-Цендера. На модуль компьютерной обработки сигнала одновременно подавалась информация о центральной частоте лазера Finisar S7500, частоте модуляции, направляемой на модулятор Маха-Цендера тонкой перестройки. Экспериментальная установка использовалась для построения спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток. В разделе приведены результаты сканирования волоконных брэгговских решеток, полученные на разработанной экспериментальной установке.

Результат исследования спектральной характеристики волоконной брэгговской решетки с фазовым сдвигом на длине волны 1502.3 нм приведен на рисунке 7, где исследование спектральной характеристики велось с шагом перестройки центральной длины волны ОВА около 10 МГц.

Как можно видеть, восстановление амплитудно-частотной характеристики особенности волоконной брэгговской решетки происходит полностью. Красной линией на рисунке 7 наложена амплитудно-частотная характеристика части спектра волоконной брэгговской решетки, предоставленная производителем (Technica Optical Components, LLC, USA, номер заказа #AY-910415-1, волоконная брэгговская решетка с фазовым сдвигом, центральная длина волны 1500 нм). Измеренная фазово-частотная характеристика части спектра волоконной брэгговской решетки приведена синей линией.

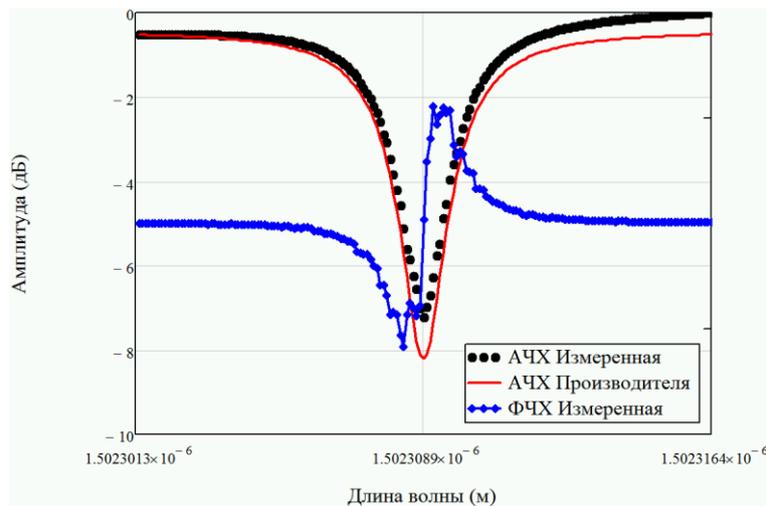


Рисунок 7 – Амплитудно-частотная характеристика волоконной брэгговской решетки, построенная на экспериментальной установке, собранной НИИ ПРЭФЖС, КНИТУ-КАИ при участии автора

В *пятом разделе* сформулированы основные выводы по главе.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность результатов проведенных научных исследований можно квалифицировать как решение актуальной научно-технической задачи улучшения метрологических и технико-экономических характеристик оптических векторных анализаторов на основе применения в них в качестве перестраиваемых сканирующих излучений спектрально чистых асимметричных трехчастотных асимметричных по амплитуде и/или частоте сигналов. Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе систематизации и анализа информации о существующих и перспективных оптических векторных анализаторах определены возможные пути улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик. Сформулированы требования к формированию специального сканирующего трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте излучения, которое позволит упростить конструкцию оптических векторных анализаторов.

2. Построена математическая модель взаимодействия специального трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте излучения с произвольным оптическим устройством. Выведены основные соотношения математической модели, позволяющие определить амплитудную и фазовую характеристику оптического устройства в каждой точке сканирования. Сформулированы требования к формированию асимметричного трехчастотного излучения. Проведены оценки максимальной относительной погрешности восстановления спектральных характеристик. Показано, что предложенный метод позволяет проводить контроль спектральных характеристик с относительной погрешно-

стью, не превышающей 10^{-4} от полной шкалы измерений. Получено упрощение оптико-электронной схемы сканирования, заключающееся в том, что радиотонный анализ биений сканирующего сигнала осуществляется на фиксированных разностных частотах трехчастотного излучения.

3. Разработаны принципы и способы формирования трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте оптического излучения с согласованностью начальных фаз излучения, которые позволяют избавиться от необходимости подавления нежелательных боковых составляющих высших порядков. Проведены исследования предложенной математической модели на основе численного и имитационного моделирования. Показано, что предсказания математической модели полностью согласуются с результатами моделирования. Предложен метод двухэтапной перестройки центральной частоты сканирующего излучения, комбинирование грубой (с шагом ~ 500 МГц) и точной (с шагом ~ 100 КГц) перестройки частоты позволяют осуществлять сканирование характеристик оптических устройств с любой наперед заданной разрешающей способностью по частоте.

4. Разработаны практические рекомендации по проектированию оптических векторных анализаторов на основе трехчастотного асимметричного по амплитуде и/или частоте зондирующего излучения со сканированием. Даны рекомендации по выбору оптико-электронных компонент измерительной системы. Предложена оптико-электронная схема оптического векторного анализатора, на основе которой проведен натурный эксперимент по восстановлению спектральной характеристики окна прозрачности волоконной брэгговской решетки с разрешающей способностью 10 МГц. Получено улучшение метрологических характеристик оптических векторных анализаторов на основе применения в них трехчастотного асимметричного сканирующего излучения, позволяющее осуществлять сканирование исследуемых оптических устройств с разрешающей способностью до 10 МГц и относительной погрешностью не более 10^{-4} . Получено улучшение технико-экономических характеристик за счет упрощения оптико-электронной схемы сканирования, заключающееся в том, что анализ биений сканирующего сигнала осуществляется на фиксированных разностных частотах трехчастотного сканирующего излучения в отличие от оптических векторных анализаторов, основанных на принципах однополосной и двухполосной модуляции, которые требуют перестройку центральной частоты анализирующих фильтров.

Результаты диссертационной работы внедрены в виде оптических векторных анализаторов, их отдельных элементов, программных средств, практических рекомендаций по проектированию, методик измерения в учебно-методический и научный процесс в КНИТУ-КАИ.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по специальности 05.11.13:

1. Сахбиев Т.Р. Оптические векторные анализаторы сетей симметричного типа / Т.Р. Сахбиев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 5. – С. 144-147.
2. Сахбиев Т.Р. Асимметричный по частоте двухполосный оптический векторный анализатор спектра / Р.А. Нуруллин, Р.Р. Самигуллин, Т.Р. Сахбиев // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3 (50). – С. 19.

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus/WoS:

3. Sakhbiev T.R. Optical vector analyzer based on carrier-suppressed double-sideband modulation and phase-shift fiber bragg grating / Morozov O.G., Nureev I.I., Sakhabutdinov A.Z., Nurullin R., Papazyan S., Sarvarova L.M., Misbakhov R.S., Sakhbiev T.R. // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2019. – С. 111460R.
4. Sakhbiev T.R. Optical vector network analyzer based on unbalanced amplitude-phase modulation / Sakhbiev T.R., Morozov O.G., Sakhabutdinov A.Z., Nureev I.I., Faskhutdinov L.M. // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018. – 2018. – С. 8456939.

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК по смежным специальностям:

5. Сахбиев Т.Р. Алгоритм зондирования высокодобротных волоконно-оптических структур / Р.Р. Губайдуллин, В.А. Заболотный, Т.Р. Сахбиев, А.А. Тяжелова, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, Л.М. Сарварова, Р.Ш. Мисбахов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 6. – С. 16-19.
6. Сахбиев Т.Р. Алгоритм формирования двухчастотного зондирующего излучения для мониторинга симметричных высокодобротных волоконно-оптических структур / В.А. Заболотный, Р.Р. Губайдуллин, Т.Р. Сахбиев, А.А. Тяжелова, О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, Л.М. Сарварова, Р.Ш. Мисбахов, А.А. Василец // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 6. – С. 20-23.
7. Сахбиев Т.Р. Оптический векторный анализатор на основе двухполосной модуляции с подавленной несущей и волоконной брэгговской решетки с фазовым сдвигом / О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, Т.Р. Сахбиев, А.Р. Нуруллин // Фотон-экспресс. – 2018. – № 5 (149). – С. 24-30.
8. Сахбиев Т.Р. Полигармонический мониторинг толщины тонких пленок / Т.Р. Сахбиев, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, Д.И. Касимова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 2. – С. 53-55.

Материалы докладов:

9. Сахбиев Т.Р. Монохроматический многочастотный метод мониторинга оптических покрытий / Т.Р. Сахбиев, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, А.А. Тяжелова, О.Г. Морозов, Л.М. Сарварова // Прикладная электродина-

мика, фотоника и живые системы – 2018: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / под ред. А.А. Иванова. – 2018. – С. 198-199.

10. Сахбиев Т.Р. Векторный анализатор для мониторинга оптических покрытий / Т.Р. Сахбиев, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, А.А. Тяжелова, О.Г. Морозов, Л.М. Сарварова // Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2018: – материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / под ред. А.А. Иванова. – 2018. – С. 200-201.
11. Сахбиев Т.Р. Векторный анализатор для мониторинга оптических покрытий / Т.Р. Сахбиев, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, А.А. Тяжелова, О.Г. Морозов, Л.М. Сарварова // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 21-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – 2018. – С. 63-64.
12. Сахбиев Т.Р. Многочастотный и векторный методы мониторинга тонкопленочных фильтров / Т.Р. Сахбиев, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев, А.А. Тяжелова, О.Г. Морозов, Л.М. Сарварова, В.Д. Сарваров // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: материалы XX Международной научно-технической конференции, XVI Международной научно-технической конференции: в 2-х томах. – 2018. – С. 205-207.
13. Сахбиев Т.Р. Развитие монохроматических методов мониторинга оптических покрытий / Т.Р. Сахбиев, И.И. Нуреев, А.Ж. Сахабутдинов, Л.М. Сарварова, А.А. Тяжелова, В.И. Артемьев // II Научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2017. Оптические технологии в телекоммуникациях ОТТ-2017: материалы XV Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 138-139.
14. Сахбиев Т.Р. Двухчастотное зондирование упорядоченной интегральной волноводной решетки / Т.Р. Сахбиев, Д.В. Малых, Л.М. Сарварова, А.А. Тяжелова // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – 2016. – С. 56-57.
15. Сахбиев Т.Р. Двухчастотное зондирование тонкопленочного фильтра с окном прозрачности / Т.Р. Сахбиев, Д.В. Малых, Л.М. Сарварова, А.А. Тяжелова // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. – 2016. – С. 58-59.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ А4

Издательство КНИТУ-КАИ
420111, Казань, К. Маркса, 10