


На правах рукописи



**ТАЛИПОВ АНВАР АЙРАТОВИЧ**

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
ЗОНДИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОНТУРА УСИЛЕНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА-БРИЛЛЮЭНА  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И РАСТЯЖЕНИЯ/СЖАТИЯ  
В ОДНОМОДОВОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор **Морозов Олег Геннадьевич**.

**Официальные оппоненты:**

**Виноградова Ирина Леонидовна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), кафедра телекоммуникационных систем, профессор кафедры.

**Кузнецов Алексей Геннадьевич**, кандидат физико-математических наук, Институт Автоматики и Электростроения СО РАН, научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

Защита состоится «17» февраля 2015 года в «16» часов на заседании диссертационного совета Д212.079.06, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» по адресу: 420015, г. Казань, ул. Л. Толстого, 15 (учебный корпус №3, ауд. 216).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ, Ученому секретарю диссертационного совета Д212.079.06.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_ года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент

Бердников Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Применение эффекта вынужденного рассеяния Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ) в области сенсорных систем позволило создать новые волоконно-оптические датчики (ВОД) – бриллюэновские датчики распределенного типа, сводимые к измерению температуры и механического напряжения, вызванного деформациями растяжения/сжатия. В течение последних лет с их помощью была показана возможность распределенных измерений температуры в оптических волокнах протяженностью до 50 км с разрешением  $\pm 1^\circ\text{C}$  и пространственным разрешением до 10 м, а также механических напряжений в оптических волокнах протяженностью до 22 км с разрешением  $\pm 20$   $\mu\text{еи}$  и пространственным разрешением до 5 м. Принципы измерительного преобразования в указанных распределенных ВОД основаны на зависимости от температуры и от величины деформаций центральной частоты, максимальной амплитуды и полной ширины на полувысоте контура усиления Манделштама-Бриллюэна (КУМБ), сформированного в силу эффекта ВРМБ в одномодовом оптическом волокне. Таким образом, определение основных характеристик КУМБ является первой основной задачей измерения параметров физических полей к волокну с помощью бриллюэновского распределенного ВОД. Второй основной задачей в бриллюэновских распределенных ВОД является определение места приложения физических полей к волокну и определение положения КУМБ по его длине с обеспечением требуемого пространственного разрешения измерений. Решение данной задачи обеспечивается использованием различных локационных технологий: временных, частотных, корреляционных и т.д. Основной акцент в данной диссертационной работе сделан на поиск способов решения первой задачи в силу ее большей информационной значимости.

Для классического измерительного преобразования параметров физических полей в распределенных ВОД используются такие дорогостоящие оптико-электронные системы (ОЭС), как бриллюэновские оптические рефлектометры различных типов, оптические анализаторы спектра и др. В последнее время появились более практичные ОЭС, основанные на технологиях непрерывных перестраиваемых одночастотных лазеров и модуляционных преобразований. В этом случае определение характеристик КУМБ можно условно разделить на две подзадачи. Первая подзадача соответствует нахождению с помощью перестраиваемого

лазера только центральной частоты КУМБ, определение зависимости которой от величины приложенных физических полей вполне достаточно для решения большинства задач. Данная зависимость линейна в диапазоне измерения температур от  $-40$  до  $+100$  °С ( $1,36$  МГц/°С) и растяжения до  $1\%$  ( $594,1$  МГц/%). Вторая подзадача – нахождение максимальной амплитуды и добротности КУМБ с помощью методов модуляционных преобразований, определение которых необходимо для устранения мультипликативности отклика волокна на температуру и растяжение. Под добротностью контура усиления Мандельштама-Бриллюэна будем понимать отношение его центральной частоты к ширине контура на полувысоте. При увеличении температуры коэффициент усиления увеличивается, ширина линии уменьшается, а их произведение не изменяется и не зависит от температуры; при увеличении растяжения коэффициент усиления уменьшается, а ширина линии остается практически постоянной.

Исследованиям в данной области посвящены труды зарубежных ученых, в том числе A.R. Chraplyvy, D. Benito, R. Bernini, M. J. Garde, A. Loayssa, M. Nikles, X.P. Mao, I. Oh, N. Shibata, R.W. Tkach, L. Zeni, L. Thevenazi др. Известны разработки российских ученых С.А. Бабина, И.Л. Виноградовой, В.Г. Воронина, М.В. Дашкова, Е.А. Кузина, Ю.Н. Кульчина, А.С. Куркова, О.Е. Наний, А.А. Фотиади и др., ведущих исследования в федеральных, национальных исследовательских и государственных университетах, а также научных учреждениях РАН.

Представленные в работах данных авторов способы зондирования и определения характеристик КУМБ имеют ряд ограничений.

Классический способ определения характеристик КУМБ основан на использовании двух лазеров: одного – для накачки ВРМБ, а другого – для зондирования сформированного спектра усиления. Недостаток этого способа состоит в необходимости строгого контроля разности частот и фаз двух источников. Решением является усовершенствованный способ, в котором электрооптический модулятор Маха-Цендера (ММЦ) формирует двухчастотный сигнал, представляющий собой боковые полосы лазера накачки, одна из которых потом используется для зондирования КУМБ. Дальнейшее развитие способы зондирования КУМБ получили при использовании амплитудной двухполосной модуляции, амплитудной модуляции с подавленной несущей, однополосной модуляции и т.д. Несмотря на ряд преимуществ, реализация этих способов не всегда эффективна, в силу оставшейся

характерной невысокой чувствительности измерений в широкой полосе частот. Ограничения на точность измерений накладывает использование для зондирования КУМБ только одной составляющей из сложного спектрального набора сформированных излучений. Остальные составляющие используются лишь как опорные для обеспечения детектирования с элементами гетеродинирования. При этом сказываются такие факторы, как монотонность или осцилляции КУМБ в области центральной частоты, влияние низкочастотных шумовых флуктуации на точность амплитудных измерений.

В последнее время значительное развитие получили способы полигармонического зондирования и определения характеристик ВРБ, в том числе с узкополосными окнами прозрачности лоренцевского типа, в которых для зондирования используется две спектральные компоненты. Учитывая ряд преимуществ, которыми обладают указанные способы, и схожесть характеристик КУМБ и ВРБ, следует проанализировать возможность применения данных способов для решения задач, поставленных в настоящей диссертации. Особое внимание следует обратить на равенство коэффициента модуляции частоты биений компонент единице при равенстве их амплитуд.

Анализ ОЭС и способов зондирования и определения характеристик КУМБ показал, что необходимо как усовершенствование уже существующих способов, так и разработка новых, что подтверждает актуальность диссертационной работы. Для дальнейших исследований нами предложены способы, которые основаны на использовании преимуществ полигармонических зондирующих излучений, которые характеризуются возможностью переноса спектра измеряемого сигнала в область минимальных шумов фотоприемника, а также эффективными способами обработки получаемой информации по характеристикам огибающей частоты биений спектральных компонент. Тематика и содержание работы соответствуют планам научных исследований, выполняемых КНИТУ-КАИ в рамках Постановлений Правительства РФ, федеральных целевых программ и государственных заданий Минобрнауки РФ, а также инициативных договоров.

**Объект исследования**– опико-электронные системы зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне

**Предмет исследования** – полигармонические способы и средства зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна,

как основных характеристик измерительного преобразования температуры и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне.

**Цель работы** – улучшение метрологических и технико-экономических характеристик оптико-электронных систем зондирования и определения характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне на основе применения в них полигармонических зондирующих излучений и определения характеристик по параметрам огибающих биений их частотных компонент.

**Научная задача диссертации** – разработка принципов построения и методов анализа оптико-электронных систем зондирования и определения характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна, основанных на способах применения в них полигармонических зондирующих излучений и оценке параметров огибающих биений их частотных компонент на стадиях поиска центральной частоты, определения максимального усиления и ширины контура, как основных характеристик измерительного преобразования температуры и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне.

Решение поставленной задачи научного исследования проводилось по следующим основным направлениям:

1. Сравнительный анализ существующих и перспективных ОЭС зондирования и определения характеристик КУМБ; выявление резервов для совершенствования их метрологических и технико-экономических параметров на основе применения в них полигармонических способов и устройств для их реализации.

2. Разработка полигармонических способов зондирования КУМБ и определения центральной частоты, базирующихся на использовании различных вариантов двухчастотного зондирования и анализа огибающей биений его компонент, с целью повышения точности и чувствительности измерений. Имитационное моделирование разработанных полигармонических способов зондирования и определения характеристик КУМБ.

3. Разработка полигармонических способов зондирования КУМБ и определения максимального усиления и добротности контура, базирующихся на использовании четырехчастотного зондирования и анализа огибающей биений его компонент, с целью повышения точности и чувствительности измерений. Имитационное моделирование разработанных полигармонических способов зондирования и определения характеристик КУМБ.

4. Проведение экспериментальных исследований и разработка на основе их результатов практических рекомендаций по созданию ОЭС зондирования и определения характеристик КУМБ для применения в комплексах измерения температуры и деформаций растяжения/сжатия одномодового оптического волокна. Анализ погрешностей измерений и их источников, определение мер по их минимизации. Внедрение результатов и оценка перспектив исследований.

**Методы исследования.** При выполнении данной работы применялись методы математической физики, оптомеханики, методы имитационного программного моделирования ВРМБ и определения характеристик КУМБ, методы спектрального анализа сигналов.

**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, таких как MATLAB 7.0.1 и OptiSystem 12.0.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем.

Выявлены резервы для совершенствования характеристик ОЭС для зондирования и определения характеристик КУМБ в одномодовом оптическом волокне, на основе применения в них полигармонических способов зондирования и определения центральной частоты, максимального усиления и добротности контура.

Дано теоретическое обоснование способов двух- и четырехчастотного зондирования и определения характеристик КУМБ. Получены результаты имитационного программного моделирования и физических экспериментов, подтвердивших повышение чувствительности и точности измерений, разработанных на их основе ОЭС, а также простоту алгоритмов определения характеристик КУМБ по равенству коэффициента модуляции частоты биений спектральных компонент зондирующих излучений единице.

Разработаны структуры и алгоритмическое обеспечение полигармонических ОЭС, реализующих способы двух- и четырехчастотного зондирования и определения характеристик КУМБ для применения в комплексах измерения температуры и деформаций растяжения/сжатия одномодового оптического волокна.

Предложены направления развития настоящих исследований на основе полигармонических способов со сканированием и многочастотным зондированием КУМБ.

**Практическая ценность работы** заключается в разработке практических рекомендаций по проектированию полигармонических ОЭС зондирования и определения характеристик КУМБ. Разработана макетная реализация системы накачки и возбуждения ВРМБ на базе DFB-лазера и узлов формирования полигармонического зондирующего излучения на основе электрооптического ММЦ. При этом достигается значительная экономия ресурсов на создание ОЭС за счет упрощения алгоритмов определения характеристик КУМБ.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты исследований использовались при выполнении НИР и НИОКР КНИТУ-КАИ в рамках работ по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 №218 (договор №9932/17/07-К-12), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение №14.В37.21.1522), государственного задания на выполнение работ по организации научных исследований (ТЗ №№7.2217.2011, 1017, 3.1962.2014/К), договоров №102-ПТ и №157814970001 с ДООО «ИРЗ ТЭК», а также в учебном процессе КНИТУ-КАИ и КФ ПГУТИ, по направлениям «Радиотехника» и «Телекоммуникации», что подтверждено соответствующими актами внедрения.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на VII и VIII-ой Международной научно-технической конференции (МНТК) «Авиакосмические технологии, современные материалы и оборудование (АКТО)», Казань, 2012 и 2014 гг., XIII-ой МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций (ПТТТ)», Уфа, 2012 г., VI, VII и XI-ой Международных конференциях SPIE «Оптические технологии в телекоммуникациях (ОТТ)», Казань, 2008 г., Самара, 2009 и 2013 гг., Международной конференции OSA «Frontiers in Optics (FiO)», Орландо, Флорида, США, 2013 г., IX-ой Международной конференции IEEE по теории и технике антенн (ICATТ), Одесса, Украина, 2013 г., XIII-ой МНТК «Технологии информационного общества», Москва, 2014 г., на VI-ом Российском семинаре по волоконным лазерам, Новосибирск, 2014 г., на XI и XII-ой МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов (ФТПВП)», Санкт-Петербург, 2012 г., Н. Новгород, 2014 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе пять статей в рецензируемых журналах по списку ВАК, восемь статей



в зарубежных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, девять работ в сборниках трудов и материалов международных НТК, получены патент на изобретение и два патента на полезную модель РФ.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 125 наименований. Работа без приложений изложена на 156 страницах машинописного текста, включая 75 рисунков и пять таблиц.

**Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.07 по п. 2:** «Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач: измерения геометрических и физических величин; исследования и контроля параметров различных сред и объектов, в том числе при решении технологических, экологических и биологических задач;...».

**Личный вклад автора.** Все экспериментальные и теоретические результаты получены автором лично либо при его определяющем участии. На основе полученных результатов автором совместно с руководителем и другими членами научного коллектива написаны несколько статей.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

– способ полигармонического зондирования КУМБ и анализа параметров огибающей частоты биений составляющих двухчастотного излучения, характеризующиеся высокой точностью и отношением сигнал/шум измерений, простотой алгоритмов определения центральной частоты контура;

– способ определения характеристик КУМБ и анализа параметров огибающей частоты биений составляющих четырехчастотного излучения, отличающийся высокой точностью и отношением сигнал/шум измерений, простотой алгоритмов определения максимального усиления и добротности контура;

– результаты виртуальных и физических экспериментов, подтверждающие возможность реализации предложенных способов, а также демонстрирующие улучшение метрологических и технико-экономических характеристик оптико-электронных систем зондирования и определения характеристик КУМБ в целом;

– практические рекомендации по проектированию оптико-электронных систем зондирования и определения характеристик КУМБ в одномодовом оптиче-

ском волокне для определения его температуры и значений деформаций растяжения/сжатия, характеризующихся низкой стоимостью реализации;

– результаты внедрения в научно-исследовательский и образовательный процессы разработанных теоретических положений, способов, систем и их отдельных узлов и алгоритмов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

**В первой главе** исследованы распределённые измерительные системы на основе эффекта ВРМБ и его применение в других областях науки и техники, проанализированы способы зондирования и определения характеристик КУМБ, рассмотрены различные способы двухчастотного зондирования ВРБ и других резонансных структур оценена возможность их применения для зондирования и определения характеристик КУМБ.

Анализ распределённых измерительных ОЭС, проведенный в первом разделе главы, позволил определить диапазон измерений для определения основных характеристик КУМБ: центральной частоты (10-15 ГГц), ширины контура усиления на полувысоте (10-100 МГц) и его коэффициента усиления ( $10^{-11}$ - $10^{-12}$  м/Вт). При этом погрешность определения указанных частотных параметров однозначно определяется шириной линии излучения зондирующего лазера и не может превышать  $\pm 10$ -100 кГц. Для измерения амплитудных параметров погрешность определяется в основном собственными шумами фотоприемника и флуктуациями мощности лазерного источника.

Во втором разделе главы рассмотрены способы зондирования и определения характеристик КУМБ, использующиеся в одночастотных ОЭС с непрерывным зондирующим излучением. Для поиска центральной частоты, как правило, используются способы сканирования КУМБ одночастотным излучением. Частота зондирующего лазера изменяется в диапазоне до 15 ГГц путем модуляции тока инжекции сигналом пилообразной формы. Форма сигнала на выходе синхронного усилителя как функция от частоты определяет характеристики КУМБ. Усовер-

шенствованный способ основывается на использовании внешнего электрооптического модулятора, который формирует двухчастотный сигнал, представляющий собой боковые полосы лазера накачки, используемые в дальнейшем для зондирования в контуре усиления и поглощения ВРМБ. Недостаток данного способа – необходимость учета вкладываемых в контур усиления мощностей и механизмов перекачки энергии между составляющими накачки и зондирования, отсутствие которого может привести к насыщению контура и появлению погрешностей. Продвижение в развитии методов зондирования и определения характеристик КУМБ было связано с методом, базирующемся на формировании сканирующего двухполосного амплитудно-модулированного зондирующего излучения из излучения накачки. Тем не менее, данный метод имеет невысокую чувствительность и точность из-за необходимости приема и обработки сигналов в широкой полосе частот и присутствия верхней боковой полосы. Сам КУМБ зондируется только нижней боковой составляющей, что энергетически не выгодно и значительно снижает чувствительность измерений. Система, свободная от этого ограничения, базируется на преобразовании спектра усиления Мандельштама-Бриллюэна из оптической области в электрическую с помощью однополосного амплитудно-модулированного излучения, где верхняя боковая подавлена. Недостатком является оставшаяся невысокая чувствительность измерений, сходная с измерениями двухполосным амплитудно-модулированным зондирующим излучением в широкой полосе частот. Результаты проведенного анализа однозначно свидетельствуют о необходимости разработки новых способов зондирования и определения параметров КУМБ, лишенных данных недостатков и ограничений.

С этой целью в третьем разделе главы были исследованы способы двухчастотного зондирования ВРБ и других резонансных датчиков, как структур близких по природе и математическому описанию формы огибающей (КУМБ и окно прозрачности ВРБ с фазовым сдвигом описываются лоренцевским контуром, такая же форма контура может быть получена и для огибающей обычной ВРБ). Существенным отличием указанных способов зондирования является то, что контур ВРБ зондируется не одночастотным, а двух, трех, четырехчастотным..., поэтому они названы полигармоническими. Их преимуществами является возможность обработки информационных составляющих по огибающей частоты биений, находящейся в зоне минимальных шумов фотоприемника, возможность определять центральную частоту не сканируя зону максимума контура, которая характеризу-

ется определенной монотонностью, а также достаточно низкой стоимостью практической реализации по сравнению со спектральной и бриллюэновской рефлектометрической аппаратурой. Особое внимание нами было уделено возможности определения резонансной частоты датчиков или центральной частоты ВРБ по равенству коэффициента модуляции частоты биений зондирующих компонент единице при равенстве их амплитуд.

Таким образом, был определен круг нерешенных проблем, связанных с разработкой ОЭС на основе полигармонических способов зондирования и определения характеристик КУМБ, как основных характеристик измерительного преобразования температуры и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне, что позволило сформулировать в конце главы научно-технические задачи для дальнейших исследований, решение которых необходимо для достижения поставленной ранее цели работы.

**Во второй главе** представлен способ полигармонического зондирования КУМБ в одномодовом оптическом волокне, основанный на использовании преимуществ однополосной модуляции для преобразования комплексного спектра КУМБ из оптической области в электрическую, двухчастотного зондирующего излучения и алгоритмов определения центральной частоты по анализу параметров огибающей частоты биений их спектральных компонент.

Оптический сигнал от лазерного диода (ЛД) с длиной волны 1550 нм и шириной полосы излучения около 100 кГц разделяется по двум каналам устройством оптической развязки (УОР) (рис.1).

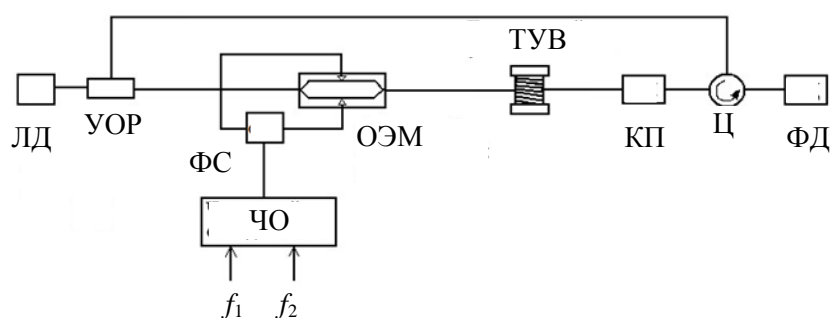


Рис. 1 – Структурная схема экспериментальной установки

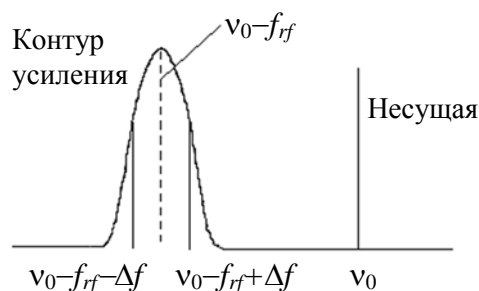


Рис. 2 – К пояснению процесса зондирования КУМБ двухчастотным излучением

В первом канале излучение модулируется в электрооптическом однополосном двухканальном ММЦ (ОЭМ), на вход которого через фазосдвигатель (ФС) и частотный объединитель (ЧО) подается два сигнала на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , разность

между которыми не превышает ширины КУМБ на полувысоте. При этом их средняя частота близка к центральной частоте  $f_{MB}$ .

Далее модулированный сигнал подается на тестируемый участок волокна (ТУВ), в котором встречно распространяется оптическое излучение, прошедшее по второму каналу, циркулятор (Ц) и контроллер поляризации (КП). Немодулированное излучение является излучением накачки ВРМБ в ТУВ. Таким образом, однополосное двухчастотное излучение с составляющими  $f_{s1} = \nu_0 - f_{rf} - \Delta f$  и  $f_{s2} = \nu_0 - f_{rf} + \Delta f$  зондирует контур усиления (рис. 2), при этом частота  $\nu_0 - f_{rf}$  при настройке на центр контура усиления соответствует его центральной частоте  $f_{MB}$ , расстройка  $\Delta f$  – половине его полуширины  $\Delta\nu_{MB}$ , а частота несущей  $\nu_0$  – частоте накачки  $\nu_P = c/\lambda_P$ . Двухчастотное излучение, прошедшее через ТУВ принимается фотодетектором (ФД). Излучение на выходе оптического однополосного модулятора определяется выражением:

$$E_{in}(t) = A_0 \exp(j2\pi\nu_0 t) + A_{-1} \exp[j2\pi(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)t] + A_{-2} \exp[j2\pi(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)t], \quad (1)$$

где  $A_0 = |A_0| \exp(j\varphi_0)$ ,  $A_{-1} = |A_{-1}| \exp(j\varphi_{-1})$ ,  $A_{-2} = |A_{-2}| \exp(j\varphi_{-2})$  – комплексные амплитуды оптической несущей и двухчастотного сигнала.

Оптическая область на выходе волокна будет определяться выражением

$$E_{out}(t) = A_0 |H(\nu_0)| \exp[j \arg H(\nu_0)] \exp(j2\pi\nu_0 t) + A_{-1} |H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)| \exp[j \arg H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)] \times \exp[j 2\pi(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)t] + A_{-2} |H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)| \exp[j \arg H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)] \times \exp[j 2\pi(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)t]. \quad (2)$$

Выходной ток на частоте биений между двумя зондирующими составляющими  $2\Delta f$  пропорционален:

$$|i_{out}(t)| \propto |A_{-1}| |A_{-2}| |H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f)| |H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)| \times \cos[4\pi t \Delta f + \varphi_{-1} - \varphi_{-2} + \arg H(\nu_0 - f_{rf} - \Delta f) - \arg H(\nu_0 - f_{rf} + \Delta f)]. \quad (3)$$

Из электрического выходного сигнала детектора можно получить образ оптической передаточной функции на частотах двух зондирующих сигналов. Оптическая передаточная функция ТУВ эквивалентна последовательному соединению линейной передаточной функции волокна и контура усиления Мандельштама-Бриллюэна.

Для поиска центральной частоты введем в алгоритм определения характеристик параметр эквивалентный коэффициенту амплитудной модуляции огибаю-

щей частоты биений. При его равенстве единице центральная частота будет определяться как:

$$f_{MB} = (f_{s1} + f_{s2})/2, \quad (4)$$

при известных частотах  $\nu_0$  и  $f_{1,2}$ .

Далее в главе рассмотрены различные варианты обработки информации на частотах спектральных составляющих зондирующего двухчастотного излучения. В частности, проанализированы вариант преобразования спектра из оптической в электрическую область с помощью однополосной модуляции и одночастотного зондирования (для сравнения), с помощью однополосной модуляции и двухчастотного зондирования, вариант обработки информации на частоте биений компонент только двухчастотного излучения без учета несущей. Показано, что при анализе спектра по огибающей только двухчастотного зондирующего сигнала чувствительность измерений может быть повышена в 3-6 раз.

Имитационное моделирование способа двухчастотного зондирования КУМБ проводилось в программной среде OptiSystem 12.0, мощность на выходе фотодетектора (амплитуда КУМБ) составила 320 мкВт, ширина – 100 МГц (рис. 3), смещение – 10 ГГц, центральная частота – 193,09 ТГц (на рис. 3 не показаны). На рис. 4 представлен спектр двухчастотного сигнала после зондирования КУМБ.



Рис.3 – Спектр КУМБ, полученный в результате моделирования

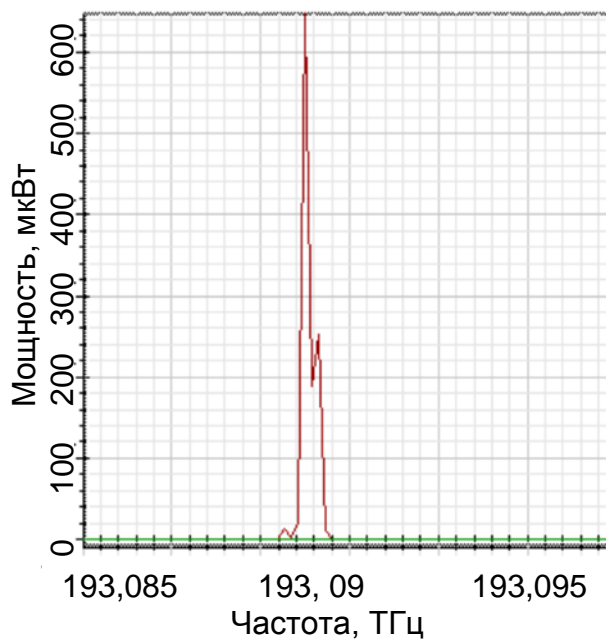


Рис. 4 – Спектр двухчастотного сигнала после зондирования КУМБ

При зондировании КУМБ происходит изменение амплитуд составляющих двухчастотного зондирующего колебания, они становятся не равными в зависи-

мости от взаимного положения его средней частоты и центральной частоты контура усиления Манделъштама-Бриллюэна. При равенстве последних амплитуды составляющих зондирующего колебания равны.

Таким образом, во второй главе дано теоретическое обоснование способа двухчастотного зондирования КУМБ и определения центральной частоты. Разработана структурная схема для создания ОЭС на его основе. Проведено имитационное моделирование способа в среде OptiSystem 12.0, что позволило доказать преимущества способа и возможность получения выигрыша по чувствительности и точности определения центральной частоты КУМБ.

**В третьей главе** представлен способ определения характеристик КУМБ, основанный на анализе коэффициента модуляции частоты биений между составляющими четырехчастотного излучения. Решаемая техническая задача заключается в повышении чувствительности и точности измерений указанных характеристик КУМБ.



Рис. 5 – Структурная схема устройства для реализации полигармонического способа определения характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна

Предлагаемый способ определения характеристик КУМБ (рис. 5) основан на том, что генерируют зондирующее четырехчастотное излучение, подают его на вход одномодового оптического волокна, в котором с помощью излучения накачки возбуждено ВРМБ и сформирован КУМБ в зоне приложения внешнего воздействия ( температуры, деформации растяжения / сжатия ), перестраивают среднюю частоту зондирующего колебания в диапазоне измерений,

соответствующем ширине КУМБ, регистрируют изменения параметров излучения, по которым определяют центральную частоту  $f_{MB}$ , максимальную амплитуду  $U_{MB}$  и добротность КУМБ  $Q_{MB}$ .

Зондирующее излучение формируют четырехчастотным с четырьмя составляющими равной амплитуды соответственно на частотах  $f_{11}, f_{21}, f_{22}, f_{12}$  со средней частотой  $f_c = (f_{12} + f_{11})/2 = (f_{22} + f_{21})/2$  и разностными частотами  $\Delta f_{P1} = f_{12} - f_{11}$  и  $\Delta f_{P2} = f_{22} - f_{21}$ , меньшими или одной из них равной ширине КУМБ, и направляют в волокно. Далее перестраивают среднюю частоту  $f_c$  зондирующего колебания, причем в ходе перестройки разностные частоты оставляют неизменными, регистрируют изменение средней частоты зондирующего колебания и параллельно измеряют коэффициенты модуляции  $m_1$  и  $m_2$  огибающих частот биений между составляющими зондирующего колебания соответственно  $f_{11}, f_{12}$  и  $f_{21}, f_{22}$  на выходе волокна. По достижении коэффициентом модуляции значения  $m_1 = m_2 = 1$  измеряют центральную частоту  $f_{MB}$ , КУМБ, как равную значению средней частоты  $f_c$  в данный момент времени, и измеряют соответствующие ему амплитуды огибающих частот биений между составляющими зондирующего колебания  $U_1$  для  $f_{11}, f_{12}$  и  $U_2$  для  $f_{21}, f_{22}$ . Далее вычисляют максимальную амплитуду  $U_{MB}$  и добротность КУМБ  $Q_{MB}$

$$U_{MB} = \sqrt{(\chi^2 U_1^2 - U_2^2)/(\chi^2 - 1)}; Q_{MB} = \frac{f_{MB}}{\Delta f_{Pi}} \sqrt{(U_{MB}/U_i)^2 - 1}, \quad (5)$$

где  $\chi = U_2 \Delta f_{P2} / U_1 \Delta f_{P1}$ ,  $i$  равно 1 или 2.

Во втором разделе главы представлены алгоритмы программного обеспечения для определения характеристик КУМБ по предложенному способу.

Далее проведено имитационное моделирование разработанного способа определения характеристик КУМБ в программной среде OptiSystem 12.0. Полученные результаты подтверждают возможность реализации данного метода и доказывают его преимущества по повышению чувствительности и точности определения максимального усиления и добротности контура.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования погрешностей измерений при реализации разработанных способов, практические рекомендации по созданию аппаратных и программных средств полигармонического зондирования и определения характеристик КУМБ в одномодовом оптическом волокне (ОВ) для сенсорных приложений.



В первом разделе главы установлено, что основными погрешностями измерений являются: нестабильность рабочей точки ММЦ при формировании полигармонических зондирующих излучений, неидеальность формы КУМБ, методическая погрешность, связанная с необходимостью контроля равенства амплитуд составляющих четырехчастотного зондирующего излучения и коэффициента модуляции огибающих единице. Предложены способы их минимизации.

В втором разделе главы приведены результаты экспериментального формирования излучения накачки для возбуждения ВРМБ (в качестве источника излучения выбран DFB-лазер) и анализа характеристик КУМБ, который проводился с использованием волоконного интерферометра МЦ (рис. 6,а). На выходе портов интерферометра формируется сигнал рэлеевского рассеяния и компоненты ВРМБ (рис. 6,б) фиксируемые измерителем мощности и оптическим анализатором спектра. Выставляется ток накачки для обеспечения требуемого уровня сигнала. Аттенюатор выставляется таким образом, чтобы мощность излучения на входе ОВ  $\sim 3$  дБм (нелинейных эффектов нет). Путем подстройки температуры длина волны излучения выставляется таким образом, чтобы на порту, соответствующему рэлеевскому рассеянию (длины волны лазера), было максимальное значение (при этом на порту ВРМБ – минимальное значение, т.е. разница уровней максимальная). Управляя аттенюатором, выставляется уровень сигнала, вводимого в ОВ.

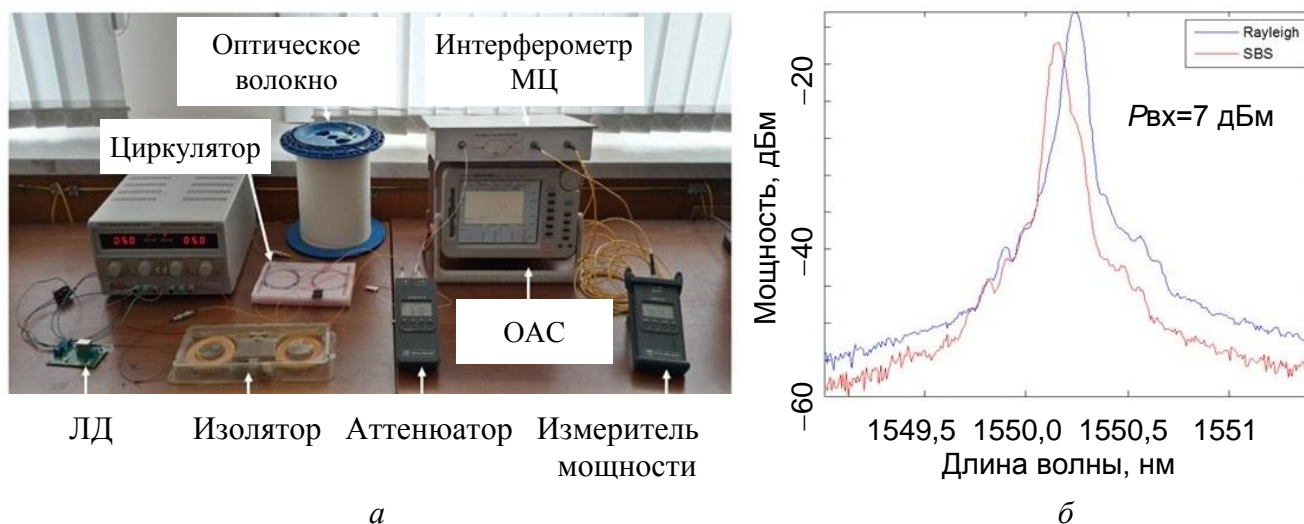


Рис. 6 – Экспериментальная установка для генерации сигнала ВРМБ (а), спектры при мощности накачки 7дБм. (б)

В третьем разделе рассмотрено формирование двухчастотного зондирующего излучения для анализа КУМБ. В качестве электрооптического ММЦ был выбран опытный образец производства ПНППК, г. Пермь (рис. 7). Лазерное излучение модулировалось по интенсивности напряжением генератора Tektronix AFG

3251. Вид и величина модулирующего напряжения задаются на генераторе, а положение рабочей точки с помощью источника постоянного смещения. Для частоты генератора 200 МГц полуволновое напряжение  $V_{\pi}=1,97$  В. Детектирование излучения происходит в фотодетекторе FDI (полоса пропускания  $<1,5$  ГГц), выходной сигнал подавался на вход осциллографа и регистрировался на съемном носителе. Регистрировался результат детектирования выходного излучения модулятора, работающего в нулевой рабочей точке  $V=1,97$  В. Амплитуда модулирующего напряжения  $U=4$  В,  $f=200$  МГц. Спектрограмма с выхода фотоприёмного устройства представлена на рис. 8.



Рис. 7 – Схема подключения электрооптического ММЦ

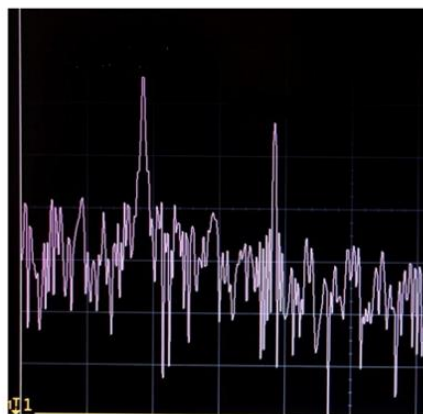


Рис. 8 – Спектрограмма сигнала фототока при работе в ММЦ "нулевой" рабочей точке

Выходной ток представляет собой периодическое колебание на удвоенной частоте модуляции и собственное выходное колебание генератора. Такой результат возможен, если выходное излучение модулятора является двухчастотным колебанием при подавленном несущем колебании, а боковые разнесены на удвоенную частоту модуляции. При увеличении напряжения смещения режим устойчивой генерации двухчастотного излучения нарушается, появляются отчетливые боковые полосы сигнала.

В четвертом разделе главы продемонстрированы результаты измерения центральной частоты КУМБ с использованием двухчастотного способа при изменении температуры. Крутизна полученной характеристики составила  $1,51$  МГц/°С. Измерения проводились на комплексной экспериментальной установке, представленной в автореферате рис. 6,а и рис. 7.

Далее в главе представлены специальные методы определения характеристик КУМБ, основанные на его двухчастотном сканировании и маломодовом зон-

дировании. Дано теоретическое обоснование указанных методов, исследование которых рассматривается как направление для перспективных работ.

**В заключении** представлены основные результаты и выводы по работе.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Совокупность результатов проведенных научных исследований можно квалифицировать как решение актуальной научно-технической задачи улучшения метрологических и технико-экономических характеристик оптико-электронных систем зондирования и определения параметров контура усиления Манделъштама-Бриллюэна как основных параметров распределенного измерительного преобразования температур и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне. Улучшение указанных характеристик достигнуто благодаря применению полигармонических излучений для зондирования контура усиления и способов анализа амплитудных соотношений в огибающих биений их частотных компонент для определения его параметров.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе систематизации и анализа информации о существующих и перспективных оптико-электронных системах зондирования и определения характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна, как основных характеристик распределенного измерительного преобразования температур и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне, определены возможные пути улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик. Показано, что дальнейшее развитие систем указанного класса может быть основано на применении в них для зондирования полигармонических излучений и реализации способов оценки амплитудных соотношений огибающих биений их частотных компонент для определения таких характеристик контура усиления, как: центральная частота, максимальный коэффициент усиления и ширина.

2. Разработан способ двухчастотного зондирования контура усиления Манделъштама-Бриллюэна и определения его центральной частоты, как основной характеристики измерительного преобразования температуры и деформаций растяжения/сжатия в одномодовом оптическом волокне. Предложена структурная схема оптико-электронной системы для реализации способа. Показано, что способ характеризуется повышенным в 3-6 раз отношением сигнал/шум измерений, ис-

ключением погрешностей, связанных с необходимостью поиска центральной частоты по максимуму усиления, и простотой предложенных процедур ее определения по амплитудным соотношениям огибающих биений двух частотных компонент. Проведено имитационное моделирование процесса двухчастотного зондирования контура усиления и определения его центральной частоты в программной среде OptiSystem, подтвердившее возможность реализации данного способа, а также повышение чувствительности и точности измерений.

3. Разработан способ четырехчастотного зондирования контура усиления Мандельштама-Бриллюэна и определения его максимального усиления и ширины, как основных характеристик измерительного преобразования, необходимых для разделения мультипликативного отклика одномодового оптического волокна по температуре и деформациям растяжения/сжатия. Предложена структурная схема оптико-электронной системы для реализации способа. Разработаны алгоритмы программного обеспечения для определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна. Показано, что в дополнение к преимуществам двухчастотного данный способ характеризуется исключением погрешностей, связанных с необходимостью его сканирования, а также простотой предложенных процедур определения максимального усиления и ширины по амплитудным соотношениям огибающих биений двух пар частотных компонент. Проведено имитационное моделирование процесса четырехчастотного зондирования контура усиления и определения его максимального усиления и ширины в программной среде OptiSystem, подтвердившее возможность реализации данного способа, а также повышение чувствительности и точности измерений.

4. Разработаны практические рекомендации по проектированию оптико-электронных систем для зондирования и определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне для распределенных измерений температурных и деформационных воздействий на него. Проведены экспериментальные исследования процессов формирования излучения накачки для возбуждения в волокне вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, а также получения двухчастотного и четырехчастотного зондирующих излучений. Продемонстрировано измерение центральной частоты контура усиления на экспериментальной макетной установке при изменении температуры. Проведен анализ основных погрешностей измерений при реализации разработанных способов и предложены решения для их минимизации. Разработаны специ-

альные способы определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна, основанные на его двухчастотном сканировании и многочастотном зондировании. Дано теоретическое обоснование указанных способов, исследование которых рассматривается как направление для дальнейшего развития работ.

Результаты диссертационной работы внедрены в виде отдельных опико-электронных систем, их узлов, программных средств, рекомендаций по проектированию и учебно-методических материалов.

Новизна и полезность технических решений подтверждены тремя патентами РФ на изобретение и полезные модели.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1.Талипов, А.А. Определение характеристик спектра усиления Мандельштама-Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов, В.Г. Куприянов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. Т.15– № 3. – С. 95–100.

2.Талипов, А.А. Определение характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна с помощью маломодового зондирования / А.А. Талипов // Наука и бизнес: пути развития. – 2013. – № 10 (28). – С. 62–67.

3.Талипов, А.А. Определение характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна с помощью двухчастотного сканирования / О.Г. Морозов, А.А. Талипов // Перспективы науки. – 2013. – № 10 (49). – С. 161–164.

4.Талипов, А.А. Маломодовое зондирование датчиков на основе волоконных решеток Брэгга / В.Г. Куприянов, О.Г. Морозов, А.А. Талипов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 200–204.

5.Талипов, А.А. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / А.А. Севастьянов, О.Г. Морозов, А.А. Талипов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 4. – С. 232–235.

### ***Публикации в иностранных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus:***

6. Talipov, Anvar A. Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures / Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov, Oleg G. Natanson [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE –

The International Society for Optical Engineering. – 2008. – V. 7026. – P. 70260I-8. DOI: 10.1117/12.801506.

7. Talipov, Anvar A. Metrological aspects of symmetric double frequency and multi frequency reflectometry for fiber Bragg structures / Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov, Oleg G. Natanson [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2008. – V. 7026. – P. 70260J-6. DOI: 10.1117/12.801507.

8. Talipov, Anvar A. Double mode system for FWM reducing / Tagir S. Sadeev, Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov [et al.] // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2008. – V. 7026. – P. 702603-6. DOI: 10.1117/12.801459

9. Talipov, Anvar A. All optical microwave filter for ROF WDM systems based on double mode method / Tagir S. Sadeev, Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2009. – V. 7374. – P. 73740A-9. DOI: 10.1117/12.829001.

10. Talipov, Anvar A. Characterization of stimulated Mandelstam-Brillouin scattering spectrum using a double-frequency probing radiation / Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov, Gennady A. Morozov, Vladimir G. Kouprianov // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2013. – V. 8787. – P. 878709-6. DOI: 10.1117/12.2017835.

11. Talipov, Anvar A. Double-frequency method for the determination of the central frequency, Q-factor and gain coefficient of SMBS gain spectrum / Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov, Vladimir G. Kouprianov // Proceedings of IEEE 9th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT 2013. – 2013. – P. 384-386. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650786.

12. Talipov, Anvar A. Research of electro-optical modulators usage for microwave photonic filters / Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov, Tagir S. Sadeev // Proceedings of IEEE 9th International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT 2013. – 2013. – P. 503-505. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650827.

13. Talipov, Anvar A. Principles of multiple frequencies characterization of stimulated Mandelstam-Brillouin gain spectrum / Oleg G. Morozov, Anvar A. Talipov, Gennady A. Morozov // Optical Technologies for Telecommunications. Proceedings of

SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2014. – V. 9156. – P. 91560K-7. DOI: 10.1117/12.2054253.

***Патенты РФ на изобретение и полезную модель:***

14. Пат. 2520537 Российская Федерация, МПК G01R 27/04. Способ измерения характеристик резонансных структур и устройство для его осуществления / Морозов Г.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2012140974/28; заявл. 25.09.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18.

15. Пат. 124812 Российская Федерация, МПК G01R27/04. Устройство для измерения характеристик резонансных структур / Морозов Г.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2012140969/28; заявл. 25.09.2012; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4.

16. Пат. 141415 Российская Федерация, МПК G01R27/04. Устройство для измерения характеристик резонансных структур / Морозов Г.А., Морозов О.Г., Талипов А.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2013152608/28; заявл. 26.11.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.

***Сборники трудов и материалов научно-технических конференций:***

17. Талипов, А.А. Исследование характеристик спектра вынужденного рассеяния Бриллюэна методом двухчастотного зондирования / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов и др. // Труды XIII МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Уфа, УГАТУ. – 2012. – С. 300-302.

18. Талипов, А.А. Определение характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна с помощью маломодового зондирования / О.Г. Морозов, А.А. Талипов // Труды XI МНТК «Оптические технологии в телекоммуникациях». – Самара, ПГУТИ.– 2013. – С. 21-23.

19. Талипов, А.А. Определение характеристик контура усиления Манделъштама-Бриллюэна с помощью двухчастотного сканирования / О.Г. Морозов, А.А. Талипов // Труды XI МНТК «Оптические технологии в телекоммуникациях». – Самара, ПГУТИ.– 2013. – С. 19-21.

20. Талипов, А.А. Маломодовая симметричная рефлектометрия волоконно-оптических структур / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов и др. // Труды XI МНТК «Оптические технологии в телекоммуникациях». – Самара, ПГУТИ.–2013. – С. 86-97.

21. Talipov, Anvar A. Double-frequency method for the determination of the parameters of SMBS gain spectrum / O.G. Morozov, A.A. Talipov, A.A. Vasilets // OSA Optics InfoBase Conference Papers. Code: 104458. Proceedings of «Frontiers in Optics-2013». – 2013. – P. FTu3A.28.

22. Талипов, А.А. Исследование спектра усиления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна в режиме полигармонического зондирования / О.Г. Морозов, В.Г. Куприянов, А.А. Талипов, И.Г. Александрова // Труды МНТК «Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской и ракетно-космической промышленности. АКТО-2014». – Казань, КНИТУ-КАИ. – 2014. – С.363-366.

23. Талипов, А.А. Полигармонические методы определения характеристик контура усиления Мандельштама-Бриллюэна / О.Г. Морозов, Г.А. Морозов, А.А. Талипов // Труды XIII отраслевой МНТК «Технологии информационного общества». – Москва, МТУСИ. – 2014. – С. 27.

24. Талипов, А.А. Многочастотные методы исследования спектра усиления Мандельштама-Бриллюэна / О.Г. Морозов, А.А. Талипов // Материалы VI Российского семинара по волоконным лазерам – Новосибирск, Академгородок. – 2014. – С. 92-93.

25. Талипов, А.А. Полигармоническое исследование спектра усиления вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна / О.Г. Морозов, А.А. Талипов, В.Г. Куприянов, И.Г. Александрова // Труды XII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – Самара: Самарское книжное изд-во. – 2014. – С. 151-153.

---

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Формат 90x64<sub>1/16</sub>  
Усл. печ.л. 1,63. Уч.-изд.л. 1,25. Печать ризографическая. Тираж 100 экз. Заказ 05/30  
Издательство ЗАО «Новое Знание»  
420029, г.Казань, ул. Сибирский тракт, 34, корпус 10, офис 6.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфическом участке ЗАО «Новое знание»  
г.Казань, ул.Сибирский тракт, 34, корпус 10.