



НУРГАЗИЗОВ МАРАТРИНАТОВИЧ

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ
МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ РАДИОСИГНАЛОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА
НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО МОДУЛЯЦИОННОГО
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ**

Специальность 05.11.07–
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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) на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий и в научно-исследовательском институте прикладной электродинамики, фотоники и живых систем.

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

Официальные оппоненты:

Багманов Валерий Хусаинович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ), кафедра телекоммуникационных систем, профессор кафедры.

Раевский Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), кафедра физики и техники оптических систем, заведующий кафедрой.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (НИ ТГУ), г. Томск

Защита состоится 03 марта 2015 года в 16-00 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. Льва 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. С развитием радиопотоники оптико-электронные системы (ОЭС) измерения мгновенной частоты радиосигналов (ИМЧР) СВЧ-диапазона становятся одним из перспективных инструментов, применяемым в различных структурах оборонного (РЛС предупреждения, разведки наземных и бортовых средств, радиоэлектронной борьбы и т.д.) и гражданского (оценка электромагнитной обстановки, программно-определяемое радио, системы связи «радио-по-волокну» и т.д.) назначения, построенным на принципах комплексной обработки радиосигналов в оптическом диапазоне электромагнитных волн. В сравнении с классическими методами, которые используют радиоэлектронные многоканальные технологии, ОЭСИМЧР имеют существенные преимущества по широкому частотному и амплитудному диапазону измерений, малым потерям, высокой электромагнитной помехоустойчивости, а также простоте структуры, компактности и малому весу.

Классические технологии ИМЧР подразумевают оценку скорости изменения фазы, как правило, одной, наибольшей по амплитуде, несущей радиосигнала (непрерывного или импульсного), принимаемой системой измерения за фиксированный период времени. Технологии ОЭСИМЧР включают в себя процессы: модуляционного преобразования радиосигналом оптической несущей; измерительного различения полученных спектральных составляющих с преобразованием типа «частота-время», «частота-пространство» или «частота-амплитуда»; оптико-электронного преобразования в фотодетекторе и вычисления однозначно зависящей от измеряемой частоты соответственно временной, пространственной или амплитудной функции сравнения (отношения) измеренного сигнала к некоторому опорному для устранения влияния нестабильности мощности лазера и сигнала.

Для модуляционного преобразования используется модуляция по интенсивности или фазе в модуляторах Маха-Цендера (ММЦ), параллельная модуляция по интенсивности и фазе в поляризационных модуляторах (ПолМ) и др. В последнее время появились данные об использовании только амплитудной модуляции с подавлением оптической несущей, как в ММЦ, так и в ПолМ, при их работе в «нулевой» точке модуляционной характеристики. При этом модуляция в ПолМ рассматривается как более эффективная по энергетическим характеристикам с возможностью повышения чувствительности измерений. Наиболее перспективной измерительной технологией построения ОЭС ИМЧР на сегодняшний день является технология различения частот с преобразованием типа «частота-амплитуда» в

волоконных средах, в том числе волоконных решетках Брэгга (ВРБ). Преимущества ВРБ заключаются в уникальном преобразовании измеряемой частоты в амплитуду, отраженного или прошедшего через нее излучения оптической несущей, промодулированной оцениваемым радиосигналом, и в возможности простого изготовления. Одна ВРБ способна преобразовывать широкий частотный спектр. Так при полной ширине решетки на полувысоте в 0,3 нм (типовой размер) диапазон измеряемых частот составит до 10-15 ГГц. Для оптико-электронного преобразования используется детектирование амплитуд составляющих, несущих информацию об измеряемой частоте, либо в широкой полосе измеряемых частот, либо в области постоянного тока узкополосного фотоприемника.

Исследованиям классических и ОЭС ИМЧР посвящены труды зарубежных ученых L. Vui, H. Chi, H. Emami, S. Fu, N. Sarkhosh, P. Shum, M. Tang, J. Yao, X. Zou и др., работающих в университетах Австралии, Канады, Китая, Сингапура. Известны разработки российских ученых, представляющих ОАО «Калужский научно-исследовательский радиотехнический институт», ОАО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца» (г. Москва), ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики» (г. Омск), ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (г. Пермь). Ведутся работы в ВУЗах РФ, которые представлены публикациями ведущих ученых и сотрудников, в том числе: А.В. Войцеховского, И.В. Самохвалова (НИ ТГУ); В.А. Бурдина, А.В. Бурдина (ПГУТИ); А.Х. Султанова, В.Х. Багманова (УГАТУ), А.С. Раевского (НГТУ) и др.

В разработанных ОЭС ИМЧР практически отсутствуют: дешевые узкополосные фотоприемники (как правило, используются дорогостоящие широкополосные с полосой пропускания до 40-60 ГГц, что определяется принципами измерения); устройства измерительного различения с линейным преобразованием «частота-амплитуда», особенно в области «низких» частот, что объясняется использованием нелинейных волоконных перестраиваемых линий задержки, фотонных фильтров, ВРБ и т.д.; модули контроля спектрального состава источника оптической несущей, выходного излучения модулятора, положения центральной длины волны ВРБ, подверженных флуктуациям различной природы, в том числе температурным, что в итоге ухудшает их метрологические характеристики.

Этому способствует устоявшийся подход к ОЭС ИМЧР, как к системе широкополосного прямого детектирования (ИМЧР по амплитуде боковых составляющих при наличии несущей). Лишь в ряде работ указывается на применение

узкополосных приемников (ИМЧР по амплитуде боковых составляющих в области постоянного тока при подавлении несущей). При этом в обоих случаях ОЭС ИМЧР рассматриваются практически без учета внутренних шумов фотоприемника типа « $1/f$ » при детектировании по постоянному току и тепловых и дробовых шумов при прямом детектировании в полосе частот, что определяет чувствительность измерений в области «высоких» частот.

В последнее время значительное внимание уделяется технологиям определения спектральных характеристик волоконно-оптических избирательных структур, основанным на применении в качестве зондирующих симметричного двухчастотного или полигармонического непрерывного излучения с подавленной несущей, полученного из последней с помощью ее последовательного амплитудно-фазового модуляционного преобразования (АФМП) по методу Ильина-Морозова (100%-ая амплитудная модуляция одночастотного когерентного излучения с последовательной коммутацией фазы на π при прохождении огибающей амплитудно-модулированного излучения минимума). Его особенностями являются высокие спектральная чистота выходного излучения и коэффициент преобразования, а также возможность получения разностной частоты, равной частоте модуляции. Последняя особенность, никогда ранее не применявшаяся в приложениях оптико-электронных систем, и является основой для данной диссертации. При этом симметричные двухчастотные излучения, полученные по методу Ильина-Морозова, могут быть также использованы как опорные или зондирующие для контроля рабочих режимов элементов ОЭС ИМЧР, реализующих модуляционное и измерительное преобразование в условиях влияния на них изменяющихся температур.

Данным исследованиям посвящены работы научной школы КНИТУ-КАИ (Г.И.Ильин, О.Г.Морозов, Ю.Е.Польский) и настоящая диссертация, что свидетельствует об актуальности ее темы. Содержание диссертации соответствует планам научных исследований КНИТУ-КАИ, выполняемых в рамках федеральных целевых программ и государственных заданий Минобрнауки РФ.

Объектом исследования являются оптико-электронные системы измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона с измерительным преобразованием типа «частота-амплитуда» в волоконных решетках Брэгга.

Предмет исследования – способы и средства амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей, измерительного и оптико-электронного преобразования полученных при этом спектральных составляющих и их использования для измерения мгновенной частоты радиосигналов и монито-

ринга рабочих режимов устройств преобразования в условиях влияния на них изменяющихся температур.

Цель работы – улучшение метрологических и технико-экономических характеристик оптико-электронных систем измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона с измерительным преобразованием типа «частота-амплитуда» в волоконных решетках Брэгга основе применения в них способов и средств амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей.

Научная задача диссертации – разработка принципов построения и методов анализа оптико-электронных систем измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона, основанных на применении в них оригинальных способов амплитудно-фазового модуляционного преобразования радиосигналом одночастотного лазерного излучения оптической несущей в симметричное двухчастотное и измерительного преобразования типа «частота-амплитуда» в волоконных решетках Брэгга специального профиля, с доказательством возможности с их помощью расширения диапазона измеряемых частот, повышения разрешающей способности измерений в области «низких» частот, повышения чувствительности измерений в области «высоких» частот и обеспечения стабильности рабочих режимов устройств, реализующих указанные преобразования в условиях изменяющихся температур.

Решение поставленной задачи научного исследования проводилось по следующим основным направлениям:

1. Сравнительный анализ характеристик существующих и перспективных ОЭС ИМЧР, в том числе построенных на основе измерительного преобразования «частота-амплитуда» в ВРБ; оценка возможности улучшения метрологических и технико-экономических характеристик указанных ОЭС ИМЧР на основе применения в них АФМП оптической несущей и использования полученных излучений, как для измерения мгновенной частоты, так и для обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования.

2. Теоретическое обоснование и структурная реализация способов ИМЧР на основе АФМП оптической несущей, направленных на расширение диапазона измеряемых частот, повышения разрешающей способности измерений в области «низких» частот и чувствительности измерений в области «высоких» частот; проведение вычислительных экспериментов для подтверждения работоспособности и оценки преимуществ разработанных способов.

3. Теоретическое обоснование и структурная реализация способов, использующих излучения, полученные с помощью АФМП оптической несущей, для обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования ОЭС ИМЧР в условиях влияния на них изменяющихся температур; проведение вычислительных экспериментов для подтверждения работоспособности и оценки преимуществ разработанных способов.

4. Разработка по результатам экспериментального макетирования практических рекомендаций по проектированию и эксплуатации ОЭС ИМЧР с усовершенствованными метрологическими и технико-экономическими характеристиками; внедрение результатов исследований и оценка перспектив дальнейшего развития исследований.

Методы исследования. При выполнении данной работы применялись методы спектрального анализа оптических и радиосигналов, методы анализа процессов электрооптических и оптико-электронных преобразований, методы моделирования ВРБ, методы математической физики.

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 MATLAB 7.0.1, OptiSystem7.0, OptiGrating 4.2.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

- Выявлены резервы для улучшения метрологических и технико-экономических характеристик ОЭС ИМЧР, основанные на применении в них АФМП оптической несущей и использования полученных излучений, как для измерений мгновенной частоты радиосигналов, так и для обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования.

- Впервые предложены способы ИМЧР с использованием особенностей АФМП оптической несущей в двухчастотное излучение, которые позволили: расширить в два раза диапазон измеряемых частот; повысить разрешающую способность измерений в области «низких» частот при дополнительном использовании ВРБ со специальной формой АЧХ; повысить чувствительность измерений в области «высоких» частот при дополнительном модуляционном расщеплении

спектральных составляющих на фиксированную разностную частоту, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника.

- Впервые предложены способы обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования «лазер-модулятор-ВРБ» ОЭС ИМЧР для устранения влияния на их спектральные характеристики изменяющихся температур. Оценены погрешности измерений при отклонении параметров преобразований от оптимальных, разработаны меры по их уменьшению.

- Разработаны структуры и алгоритмическое обеспечение ОЭС ИМЧР на основе амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей с низкой стоимостью практической реализации и эксплуатации.

Практическая ценность работы заключается в разработке узлов ОЭС ИМЧР СВЧ-диапазона с улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками, в определении оптимальных режимов их работы и обеспечении стабильности последних. К ним относятся блок модуляторов, опытные образцы ВРБ специальных типов, оптико-электронные приемники для узкополосного преобразования огибающей фиксированной разностной частоты, в том числе в интегральном исполнении, средства мониторинга рабочих режимов. Разработаны экспериментально обоснованные практические рекомендации по проектированию ОЭС ИМЧР, при которых достигается значительная экономия ресурсов на их создание и эксплуатацию.

Реализация результатов работы. Результаты исследований использовались при выполнении КНИТУ-КАИ НИР в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (соглашение №14.В37.21.1522), государственных заданий Минобрнауки РФ по техническим заданиям №7.2217.2011, №1017.2014, №3.1962.2014/К, договора №НИЦ-118 с ООО «КОМАС», а также в образовательном процессе университета по направлениям магистратуры 11.04.01 «Радиотехника» и 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IX, XI и XII-ой МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Челябинск, 2010 г., г. Екатеринбург, 2012 г., г. Н. Новгород, 2014 г., X-XI-ой международной конференции SPIE «Оптические технологии телекоммуникаций (ОТТ)», г. Уфа, 2012 г., г. Самара, 2013 г., IX-ой международной конференции IEEE «Теория и техника антенн (ICATT)»,

г. Одесса, Украина, 2013 г., международной конференции SPIE «Нелинейная оптика и ее применения VIII и квантовая оптика III», г. Брюссель, Бельгия, 2014 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе пять статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, четыре статьи в зарубежных научных изданиях, входящих в базы цитирования Web of Science и Scopus, пять работ в сборниках трудов и материалов конференций. Получено два патента РФ – один на полезную модель и один на изобретение.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 118 наименований. Работа без приложений изложена на 166 страницах машинописного текста, включая 64 рисунка и три таблицы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.07 по пункту 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; ...».

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором лично либо при его определяющем участии.

Положения, выносимые на защиту:

- способы ИМЧР на основе применения особенностей АФМП оптической несущей, в том числе с дополнительным формированием окна прозрачности в ВРБ в области «низких» частот и расщеплением составляющих двухчастотного излучения на фиксированную разностную частоту, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника;

- способы обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования ОЭС ИМЧР, в том числе контроля положения рабочей точки амплитудных модуляторов и положения центральной длины волны ВРБ, подверженных влиянию изменяющихся температур, с использованием и обработкой параметров излучений, полученных с помощью АФМП оптической несущей;

- результаты виртуальных и физических экспериментов, подтверждающие улучшение метрологических и технико-экономических характеристик ОЭС ИМЧР при использовании разработанных способов;

- практические рекомендации и результаты проектирования устройств преобразования ОЭС ИМЧР, характеризующихся низкой стоимостью реализации;

- результаты внедрения разработанных теоретических положений и практически изготовленных элементов ОЭС ИМЧР в научно-исследовательский и образовательный процесс КНИТУ-КАИ, в программу исследований ОО «КОМАС».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана 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 рассмотрены основные характеристики существующих и перспективных ОЭС ИМЧР и причины, ограничивающие возможности их широкого внедрения в практику оборонных и гражданских приложений. Проанализировано современное состояние работ по реализации модуляционного преобразования радиосигналом оптической несущей, измерительных преобразований различных типов, и оптико-электронного преобразования, которые определяют метрологические и технико-экономические характеристики ОЭС ИМЧР как оптико-электронной измерительной системы.

Лучшее на сегодняшний день структурное решение ОЭС ИМЧР получено на основе измерительного преобразования «частота-амплитуда» в ВРБ, что позволяет реализовать низкочастотное фотодетектирование и значительно снизить стоимость ОЭС в целом. Основные недостатки ОЭС ИМЧР с ВРБ – монотонность характеристик измерительного преобразования в области центральной длины волны и высокий уровень отклика решеток на температуру и деформации. На преодоление аналогичных ограничений в сенсорных и телекоммуникационных системах направлено применение специальных структур ВРБ, например, с фазовым π -сдвигом, и двухчастотных методов зондирования ВРБ с анализом параметров их огибающей на разностной частоте для контроля положения центральной длины волны ВРБ или измерения с ее помощью температуры.

Дополнительные негативные факторы для ОЭС ИМЧР вносит характер модуляционного преобразования оптической несущей. При реализации амплитудной или фазовой модуляции ширина полосы частот, определяемая боковыми полосами, как правило, в два или четыре раза больше измеряемой частоты. Это приводит к необходимости использования «широкополосных» ВРБ до 1 нм, которые, как правило, имеют невысокий коэффициент отражения, более монотонный характер

огибающей в области резонанса, в ряде случаев потребуется применение более широкополосного фотоприемника, стоимость которого значительно увеличивается с ростом полосы измеряемых частот.

Рассмотрение современного состояния работ по созданию ОЭС ИМЧР с преобразованием «частота-амплитуда» в ВРБ показало, что малое количество публикаций, в которых решены лишь частные вопросы, посвященные указанной тематике, не позволяет обоснованно подойти к выбору путей устранения указанных выше недостатков, а созданные на их основе ОЭСИМЧР не удовлетворяют пользователей по требуемым характеристикам. Поэтому базовым акцентом настоящего исследования стал подход к разработке ОЭС ИМЧР с преобразованием «частота-амплитуда» в ВРБ как к «узкополосным» системам, требующим минимизации полосы частот для измерений, формируемой при модуляционном преобразовании, минимизации зон монотонности огибающих ВРБ, минимизации уровня шумов при оптико-электронном преобразовании и минимизации своей структуры с целью уменьшения влияния изменяющихся температур на параметры рабочих режимов измерительного преобразования и на погрешность ИМЧР в целом.

Проведенный анализ позволил сформировать основные требования к проектированию ОЭС ИМЧР, которые заключаются в необходимости использования в его структуре только одного лазера, модулятора, ВРБ и по возможности только одного фотоприемника, причем узкополосного. Для метрологических характеристик ОЭС ИМЧР сформированы следующие требования: диапазон по частоте до 40 ГГц, диапазон по амплитуде до 50 дБ, погрешность до $\pm 0,2$ ГГц. Общие требования к каналам мониторинга рабочих режимов определяются необходимостью применения симметричного двухчастотного излучения для контроля положения центральной длины волны ВРБ и контроля положения рабочей точки амплитудных модуляторов. Оба канала должны быть построены с использованием универсальных для ОЭС элементов, в том числе узкополосных фотоприемников, чтобы не повышать стоимость системы в целом.

Результатом исследований, проведенных в первой главе, стала постановка задачи комплексного применения симметричных двухчастотных излучений, полученных с помощью АФМП оптической несущей по методу Ильина-Морозова, как в канале ИМЧР, так и в каналах мониторинга.

Во второй главе приведены результаты анализа АФМП оптической несущей по методу Ильина-Морозова; дано теоретическое обоснование способов ИМЧР с использованием его особенностей, которые позволили: расширить в два

раза диапазон измеряемых частот; повысить разрешающую способность измерений в области «низких» частот при дополнительном использовании ВРБ со специальной формой АЧХ; повысить чувствительность измерений в области «высоких» частот при дополнительном модуляционном расщеплении спектральных составляющих на фиксированную разностную частоту, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника; представлены результаты компьютерного моделирования в программе OptiSystem 7.0 для подтверждения работоспособности и оценки преимуществ разработанных способов.

В разд. 2.1 проведен анализ особенностей АФМП и формирования радиосигналом симметричных двухчастотных излучений с подавленной несущей. Для анализа была рассмотрена классическая обобщенная схема однопортового радиопотонного звена модуляционного преобразования, которая была преобразована из параллельной в схему последовательного типа (рис. 1) с целью реализации АФМП по методу Ильина-Морозова. В результате исследований, проведенных в

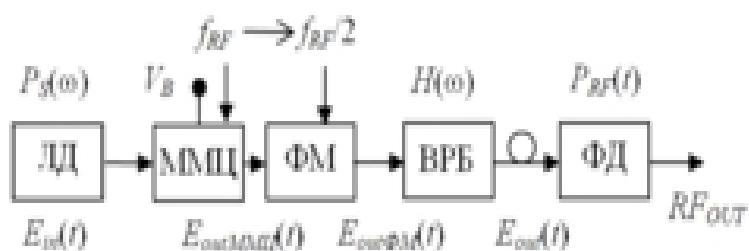


Рис. 1. Обобщенная структурная схема однопортового радиопотонного звена модуляционного преобразования последовательного типа

данном разделе, теоретически показана возможность реализации АФМП на основе амплитудного и фазового ММЦ.

Получены соотношения для расчета спектра излучения на выходе системы модуляторов при реализации указанного АФМП оптической несущей.

Показано, что при реализации АФМП возможно получение разностной частоты, равной измеряемой частоте радиосигнала. При этом оптимальными коэффициентами модуляции являются $m=5/9$ в случае использования модулирующего колебания вида $S_1(t) = S \cos(2\Omega t + \pi)$ и $m=1$ – в случае $S_2(t) = S|\sin \Omega t|$ («выпрямленная» синусоида). Спектр излучения для двух составляющих на выходе модуляторов в случае $S_1(t)$ описывается выражением:

$$E_{\text{АФМ}}(t) = 0,49E_0 \{ \sin(\omega + \Omega)t - \sin(\omega - \Omega)t \} + 0,007E_0 \{ \sin(\omega + 3\Omega)t - \sin(\omega - 3\Omega)t \} + \dots \quad (1)$$

а в случае модуляции колебанием $S_2(t)$:

$$E_{\text{АФМ}}(t) = 0,56E_0 \{ \sin(\omega_0 + \Omega)t - \sin(\omega_0 - \Omega)t \} + 0,05E_0 \{ \sin(\omega_0 + 3\Omega)t - \sin(\omega_0 - 3\Omega)t \} + \dots \quad (2)$$

Как видно из (2.1) и (2.2) разностная частота между составляющими двухчастотного излучения 2Ω равна частоте модулирующих колебаний $S_1(t)$ или $S_2(t)$. Составляющие высших гармоник можно не учитывать в силу малости их амплитуд. Получено сужение разностной частоты в два раза по сравнению с классическими схемами ее удвоения, применяемыми в практике известных ОЭС ИМЧР, при использовании одного амплитудного ММЦ, работающего для подавления несущей в «нулевой» точке модуляционной характеристики.

В разд. 2.2 представлено теоретическое обоснование способа ИМЧР с расширением диапазона измерительного преобразования по частоте в два раза. Структурная схема для его реализации показана на рис. 2,а, пояснения к принципу работы на рис. 2,б, а полученная измерительная характеристика на рис. 2,в.

Оптическая несущая с лазерного диода ЛД на частоте f_0 поступает на блок модуляторов БМ, где модулируется неизвестным по частоте f_{RF} и амплитуде A_{RF} СВЧ-сигналом, а затем разделяется на два канала в оптическом разветвителе ОР. По первому каналу излучение через вход циркулятора Ц поступает на ВРБ, отражается от нее и с выхода Ц подается на первый фотоприемник ФД1. Второй канал с ФД2 используется как опорный. Находя в микроконтроллере МК определения параметров неизвестного СВЧ-сигнала отношение амплитуд сигналов на выходе ФД1 и ФД2 получаем функцию сравнения амплитуд (ФСА), которая однозначно зависит от частоты СВЧ-сигнала и не зависит от мощности излучения лазера.

Выходное излучение БМ представляет собой двухчастотное на частотах $f_0 - f_{RF}/2$ и $f_0 + f_{RF}/2$ с подавленной несущей f_0 . Амплитуды составляющих равны A_{-1} и A_{+1} и определяются значениями функций Бесселя первого рода. Ток на выходе ФД2 в опорном канале пропорционален

$$i(t) \propto A_{-1}^2 + A_{+1}^2 + A_{-1}A_{+1}\cos 2\pi f_{RF}t, \quad (3)$$

а мощность при детектировании по постоянному току при $A_{-1} = A_{+1} = A_1$

$$P_{RF} \propto A_{-1}^2 + A_{+1}^2 = 2A_1^2. \quad (4)$$

Для измерительного преобразования «частота-амплитуда» выберем классическую ВРБ с гауссовым профилем огибающей центральной частотой f_B , которая характеризуется различным коэффициентом отражения для различных частот (рис. 2,б), определяемых зависимостью

$$R(f_{RF}) = R_B \exp[-4\ln 2[(f_{RF} - f_B)/\Delta f_B]^2], \quad (5)$$

где R_B – коэффициент отражения на f_0 , Δf_B – полная ширина ВРБ на полувысоте.

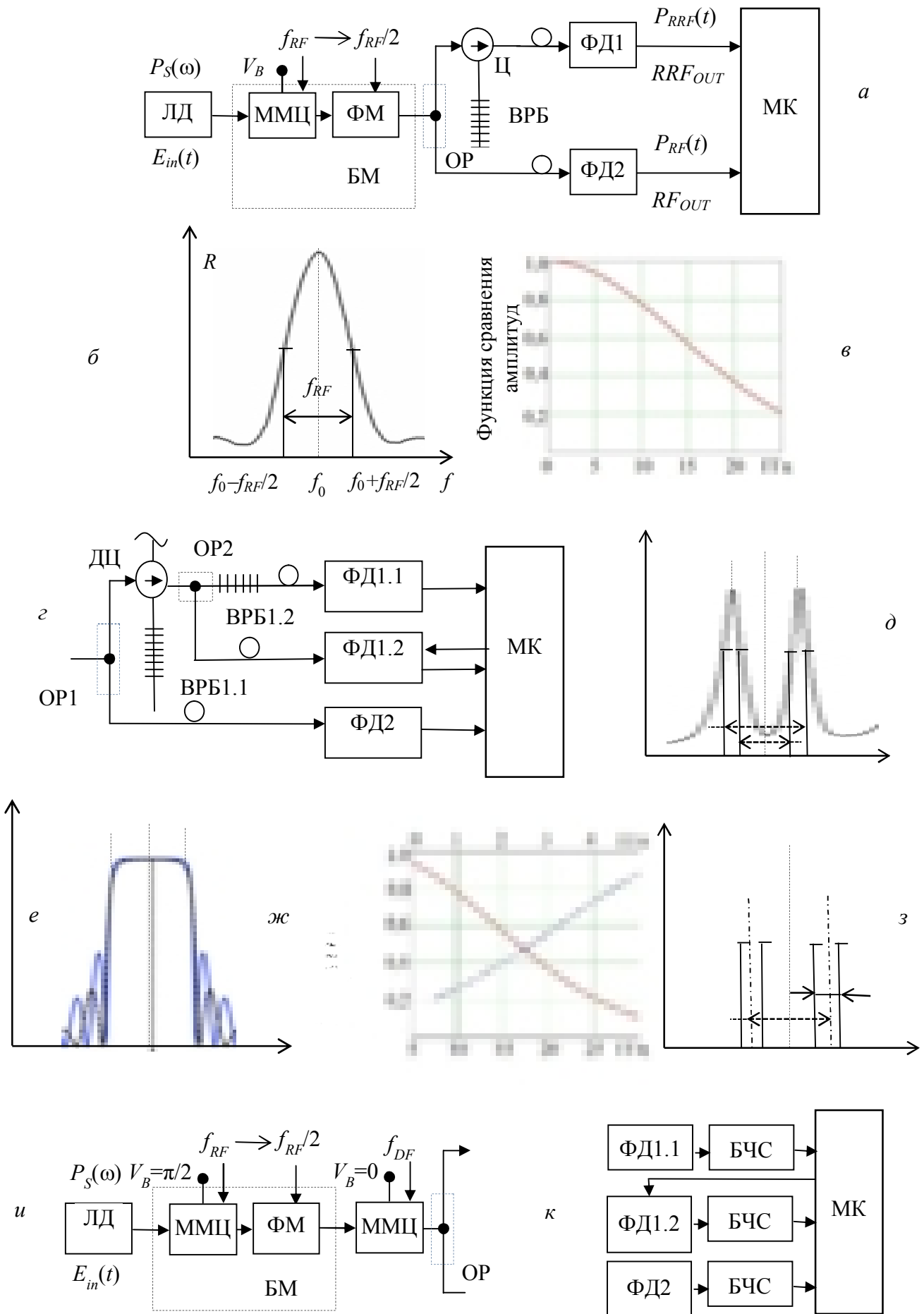


Рис. 2. К разработке полигармонических способов ИМЧР

Таким образом, при настройке центральной частоты ВРБ на частоту оптической несущей, составляющие двухчастотного излучения, отраженные от ВРБ, в зависимости от частоты будут иметь амплитуду

$$A_{-1}^{RRF} = A_{+1}^{RRF} = A_1 R(f_{RF}), \quad (6)$$

а мощность на выходе ФД1 в измерительном канале

$$P_{RRF} \propto 2A_1^2 R^2(f_{RF}). \quad (7)$$

Определив частотно-зависимую функцию отношения мощностей как $\rho = P_{RRF}/P_{RF}$, получим

$$\rho = R^2(f_{RF}). \quad (8)$$

На рис. 2,б показана однозначная зависимость между ρ и f_{RF} , рассчитанная в пакете MatLab 7.1.0, которая не зависит от мощности излучения лазера и мощности СВЧ-сигнала. Таким образом, зная только отношение мощностей ρ , мы можем определить мгновенную частоту неизвестного СВЧ-сигнала f_{RF} . Амплитуда неизвестного СВЧ-сигнала определяется по выходному сигналу ФД2 при калиброванной мощности DFB-лазера и известных характеристиках модуляционного преобразования в БМ.

Разностная частота между составляющими двухчастотного сигнала равна измеряемой частоте, что позволяет в два раза расширить диапазон измеряемых частот по сравнению с классическими методами ИМЧР при заданной полной ширине ВРБ на полувысоте.

В разд. 2.3 представлен разработанный способ ИМЧР с повышением разрешающей способности измерений в области «низких» частот. При использовании классической ВРБ в зоне «низких» частот наблюдается монотонность ее огибающей (рис. 2,б), что приводит к снижению разрешающей способности измерений. Для ее повышения была использована ВРБ с фазовым π -сдвигом и со специальной формой АЧХ, имеющая окно прозрачности в области «низких» частот, что позволило создать двухдиапазонную установку, структурная схема которой представлена на рис. 2,г, пояснения к принципу работы на рис. 2,д, а полученная измерительная характеристика на рис. 2,ж. Для разделения диапазонов была использована заграждающая ВРБ2прямоугольной формой(рис. 2,е) в диапазоне частот от f_1 до $f_2(\pm 4 \text{ ГГц})$ для организации двух каналов до и выше 4 ГГц и алгоритм коммутации последних в МК. При наличии измеряемых частот в диапазоне свыше 4 ГГц работает канал с ФД1.1, канал с ФД1.2 блокируется МК. При измерении частот до 4 ГГц канал с ФД1.2 включается с МК, поскольку уровень сигнала в канале

с ФД1.1 ниже заданного порогового. В работе приведены результаты численных расчетов в пакете MatLab 7.1.0, подтвердившие возможность повышения разрешающей способности в области «низких» частот до уровня разрешающей способности в области «средних» и «высоких» частот 0,8-1 ГГц/дБ.

В разд. 2.4 на основе анализа шумовых характеристик ОЭС, реализующих различные варианты приема двухчастотного излучения (в полосе измеряемых частот и на постоянной составляющей) был предложен способ расщепления составляющих двухчастотного излучения на фиксированную разностную частоту $f_{DF}=100$ МГц, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника (рис. 2,з). Это обеспечило узкополосный прием измеряемых составляющих и регистрацию их амплитуды по огибающей расщепленных составляющих (рис. 2,к) на f_{DF} при фильтрации в блоках частотной селекции БЧС (узкополосный фильтр с центральной частотой 100 МГц и минимальной полосой, определяемой шириной излучения лазера). Повышение чувствительности измерений по сравнению с методом прямого детектирования в полосе частот составило 3-6 раз, причем было снижено влияние фликкер-шумов фотоприемников на точность амплитудных измерений.

Структурная схема разработанной ОЭС ИМЧР на уровне модуляционного преобразования показана на рис. 2,и и отличается от рис. 2,а наличием второго амплитудного ММЦ, работающего в режиме подавления несущей частоты в «нулевой» точке. В работе проведено имитационное моделирование разработанных способов, выполненное в пакете прикладных программ OptiSystem 7.0. Вставленные в схему двухдиапазонная ВРБ 1.1 и заграждающая ВРБ 1.2 моделировалась в пакете OptiGrating 4.2. Подтверждены результаты теоретических исследований.

В разд. 2.5 представлена обобщенная схема ОЭС ИМЧР, учитывающая все преимущества разработанных способов, и приведены оценки достижимых при ее реализации характеристик измерений. Кроме того в ней представлены узлы канала мониторинга рабочих режимов отдельных элементов ОЭС ИМЧР, которые будут рассмотрены в гл. 3. Варианты выполнения структурного требования к ОЭС ИМЧР о реализации модуляционного преобразования только на одном модуляторе будут обсуждены в гл. 4.

В третьей главе в целях формирования способов мониторинга рабочих режимов элементов ОЭС ИМЧР проведен общий анализ особенностей построения звеньев АФМП и преобразования «частота-амплитуда» в ВРБ; дано теоретическое обоснование способа мониторинга рабочей точки амплитудных модуляторов при анализе спектра излучений на выходе каждого из них; дано теоретическое обос-

нование способа двухчастотного зондирования контура ВРБ с целью определения относительного ухода «длина волны оптической несущей лазера – центральная длина волны ВРБ»; исследованы источники погрешностей, связанные с влиянием не до конца подавленной в модуляторах несущей и с осцилляциями огибающей ВРБ, как дополнительные факторы, влияющие на точность амплитудных измерений; представлены результаты компьютерного моделирования в программе OptiSystem 7.0 для подтверждения работоспособности и оценки преимуществ разработанных способов.

К основным источникам погрешностей измерений в ОЭС ИМЧР с преобразованием «частота-амплитуда» на основе ВРБ относятся температурные уходы центральной частоты излучения источника оптической несущей, рабочей точки амплитудных ММЦ и центральной частоты ВРБ, различие характеристик оптоэлектронного преобразования фотодетекторов ФД1 и ФД2 и АЧХ фильтров БЧС. Первые три носят характер температурных флуктуаций, последние две могут быть сведены к минимуму при калибровке устройства или устранены применением коммутационных решений с использованием одного фотодетектора и одной системы частотной селекции.

В разд.3.1 проведен анализ звеньев ОЭС ИМЧР «лазер-модулятор» и «лазер-ВРБ», по результатам которого предложены способы обеспечения стабильности рабочих режимов элементов преобразования при изменении температуры на основе анализа спектрального состава излучений, полученных при реализации АФМП на их выходе.

В разд. 3.2 представлен способ мониторинга положения рабочей точки амплитудных модуляторов при изменении температуры, основанный на появлении в спектре выходного излучения модуляторов составляющих на несущей частоте и четных гармоник. Для амплитудных ММЦ на базе LiNbO_3 чувствительность ухода рабочей точки к температуре составляет $0,2 \text{ В/}^\circ\text{К}$. Для фазовых модуляторов положение рабочей точки не критично.

При реализации схемы максимально приближенной к обобщенной схеме ОЭС ИМЧР необходимо определять наличие составляющей на несущей частоте и четных гармоник с помощью БЧС, настроенного на частоту 50 МГц , равную половине фиксированной разностной частоты $f_{DF}=100 \text{ МГц}$, после прохождения излучения несущей всего БМ. Поскольку это позволит контролировать только рабочую точку второго амплитудного модулятора, а привязаться подобным образом к неизвестной измеряемой частоте для контроля рабочей точки первого модулятора

невозможно, была введена специальная дополнительная частота мониторинга $f_{CF} = 1$ ГГц, как максимальная частота полосы пропускания используемого фотоприемника. В этом случае с помощью БЧС дополнительно контролируется появление частоты 0,5 ГГц при появлении несущей или четных гармоник в выходном излучении первого модулятора. В разделе приведены зависимости амплитуд спектральных составляющих на выходе модуляторов от положения рабочей точки, позволившие определить регулировочные характеристики для управления ее положением.

В разд. 3.3 главы представлен способ мониторинга ухода центральной длины волны ВРБ относительно длины волны лазера при изменении температуры. Для классических ВРБ уход центральной длины волны при изменении температуры составляет $10 \text{ пм}/^\circ\text{К}$, для атермальных – $1 \text{ пм}/^\circ\text{К}$. При реализации способа длина волны лазера считается опорной, поскольку ее стабильность обеспечивается специальными мерами стабилизации, и используется как калибровочная при заданной температуре. Суть способа заключается в контроле огибающей биений двухчастотного излучения прошедшего через ВРБ, контроле коэффициента ее модуляции и знака разности фаз огибающей до и после ВРБ (патент РФ № 2495380). На рис. 3 представлены измерительные характеристики для определения расстройки центральной длины волны ВРБ от температуры.

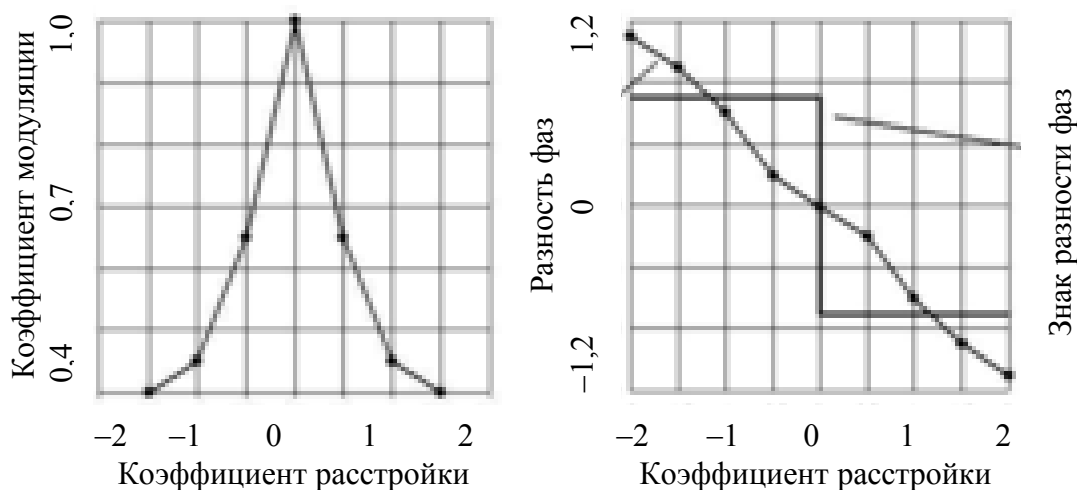


Рис. 3. Измерительные характеристики блока мониторинга «лазер-ВРБ»

При вычислении регулирующей характеристики учитывается чувствительность используемой ВРБ к изменению температуры. Разработана структура канала мониторинга (патент РФ №102256).

В разд. 3.4 исследованы источники погрешностей ИМЧР, связанные возможным наличием не до конца подавленной в блоке БМ несущей и с неоднородностью огибающей ВРБ, как дополнительных источников погрешностей, влияю-

ших на точность амплитудных измерений. Получены аналитические выражения для оценки погрешностей. Отмечено, что динамический диапазон измеряемого радиосигнала при погрешности ± 200 МГц составит соответственно 43 дБ при подавлении несущей на 60 дБ и 25 дБ при подавлении несущей на 40 дБ. Отметим, что сегодня существуют ММЦ с коэффициентом контрастности в 60 дБ.

Показано, что для мониторинга осцилляций огибающей ВРБ полученное выражение может быть использовано для оценки требуемой точности изготовления огибающей ВРБ для обеспечения требуемой точности измерений. Например, для треугольной ВРБ с крутизной склона $k=0,4$ /ГГц и точности измерения ± 200 МГц δ должна быть меньше, чем 1,6% для диапазона измерений от 1 до 10 ГГц.

В широком диапазоне работы ОЭС ИМЧР, который для военных применений составляет от -50 до $+85^\circ\text{C}$ необходимо использовать стабилизационный механизм для контроля температуры ВРБ, который при заданной погрешности ± 200 МГц должен вестись в пределах $\pm 8^\circ\text{C}$.

Четвертая глава посвящена принципам экспериментальной разработки ОЭС ИМЧР с преобразованием типа «частота-амплитуда» в ВРБ и ее узлов для реализации АФМП.

В разд. 4.1 даны практические рекомендации по выбору типа модуляторов и реализациям АФМП. На основе имитационного моделирования и экспериментального макетирования показана возможность получения разностных частот без удвоения модулирующей частоты; с точки зрения конструктивной простоты для использования в ОЭС ИМЧР рекомендованы ПолМ фирмы VersawaveInc., обладающие рядом преимуществ перед ММЦ и позволяющих реализовать преобразование на одном модуляторе в диапазоне частот до 50 ГГц, при температурах до $+70^\circ\text{C}$. Варианты выполнения структурного требования к ОЭС ИМЧР о реализации модуляционного преобразования только на одном модуляторе заключаются в использовании сдвоенных двухпортовых ММЦ или ПолМ. Для решения задач импортозамещения и максимального приближения к реализации АФМП рекомендовано обратить внимание на ЭОМ интегрального типа производства ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (г. Пермь).

В разд. 4.2 показано, что для построения ОЭС ИМЧР, использующих двухчастотные способы преобразования «частота-амплитуда», требуются ВРБ с фазовым π -сдвигом и коэффициентом пропускания окна прозрачности 95-99%, полуширина которого может изменяться в диапазоне $-0,01 \dots 0,02$ нм. Данные решетки

также могут использоваться как заграждающий фильтр для ослабления не до конца подавленной несущей при модуляционном преобразовании. Разработка способов записи указанных решеток при внесении неоднородности между фазовой маской и волокном диаметром до 2 мкм позволила создать ВРБ специального типа. АЧХ решетки, зарегистрированная на анализаторе спектра FTV 5240-Sc разрешением 2 пм, показал наличие в нем окна прозрачности шириной 100 пм (~12 ГГц), расположенным на центральной длине волны 1552,6 нм и разделяет ВРБ на две с полной шириной 200 пм (~ 24 ГГц). Полученный тип решетки позволил реализовать ОЭС ИМЧР с двумя диапазонами измерений. Преобразование «частота-амплитуда» проводилось в окне прозрачности для частот диапазона от 0,3 до 12 ГГц и в полосе отражения для частот от 12-24 ГГц.

В разд. 4.3 обсуждены вопросы макетной реализации ОЭС ИМЧР на основе разработанных способов АФМП с использованием ВРБ со специальной формой АЧХ. Приведен оценочный расчет технико-экономических показателей при ее реализации по сравнению с существующими системами. Показано, что стоимость такой реализации ОЭС ИМЧР может быть в 3-4 раза меньше стоимости типовой широкополосной системы.

В разд. 4.4 рассмотрены практические рекомендации для создания интегральных узлов и модулей ОЭС ИМЧР, предназначенных для комплексного уменьшения влияния внешних условий эксплуатации на их характеристики. В частности рассмотрены результаты экспериментального макетирования интегральных модулей: «антенна-ММЦ» в размерах ММЦ, преобразования «частота-амплитуда» на основе установки с управляемой ВРБ или ее разновидности на кольцевых резонаторах, мониторинга положения рабочей точки ММЦ с учетом спектральных процедур оценивания величины и знака ее ухода. При этом опорные значения для процедур регулирования взяты со схем контроллера температуры лазерного источника, имеющих широкое практическое применение и позволяющих определять и поддерживать температуру в пределах $\pm 0,1$ °С.

В разд. 4.5 показаны возможности перспективного применения АФМП и измерительного преобразования «частота-амплитуда» с использованием в качестве аналога ВРБ контуров усиления/поглощения, сформированных при возбуждении вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) для измерения мгновенной частоты множества радиосигналов, одновременно действующих на вход ОЭС ИМЧР. При этом разрешающая способность и абсолютная погрешность измерений может составить 10-20 МГц, что определяется собственно ши-

риной полосы контуров усиления/поглощения, а диапазон измеряемых частот при сканировании составляет до 40 ГГц. Сканирование внутри диапазона измерения осуществляется с помощью АФМП и перестройки разностной частоты двухчастотного источника накачки, формирующего ВРМБ.

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 ОЭС ИМЧР СВЧ-диапазона с измерительным преобразованием «частота-амплитуда» в ВРБ на основе применения в них АФМП оптической несущей радиосигналом с измеряемой частотой.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. На основе систематизации и анализа информации о существующих и перспективных ОЭС ИМЧР СВЧ-диапазона с измерительным преобразованием «частота-амплитуда» в ВРБ, определены возможные пути улучшения их метрологических и технико-экономических характеристик. Показано, что дальнейшее развитие систем указанного класса может быть основано на применении в них АФМП оптической несущей, как для измерения мгновенной частоты, так и для обеспечения стабильности рабочих режимов устройств преобразования.

2. По результатам анализа особенностей АФМП оптической несущей в симметричное двухчастотное излучение, расщепления его составляющих на фиксированную разностную частоту, лежащую в области минимальных шумов фотоприемника, их двухдиапазонного измерительного преобразования «частота-амплитуда» в ВРБ со специальной формой АЧХ и оптико-электронного преобразования в узкополосном фотоприемнике разработаны способы для расширения диапазона ИМЧР в 2 раза, повышения разрешающей способности измерений в области «низких» частот до уровня среднего по системе 0,8-1 ГГц/дБ, повышения чувствительности измерений в 3-6 раз по сравнению с широкополосным фотодетектированием и снижением влияния низкочастотных флуктуации на точность измерений по амплитуде.

3. По результатам анализа поведения спектральных характеристик двухчастотного излучения на выходе устройств модуляционного и измерительного пре-

образования ОЭС ИМЧР разработаны способы контроля положения рабочей точки амплитудных модуляторов и центральной длины волны ВРБ, подверженных флуктуациям различной, в том числе тепловой, природы. Разработаны рекомендации по повышению точности измерений при учете неполного подавления оптической несущей и осцилляций огибающей ВРБ, определены допустимые отклонения рабочих режимов преобразований от оптимальных.

4. На базе предложенных способов разработаны и созданы макеты устройств преобразования ОЭС ИМЧР с улучшенными метрологическими и технико-экономическими характеристиками. Разработаны рекомендации по их проектированию и применению в зависимости от требований, предъявляемых к ним решаемыми задачами и условиями эксплуатации конкретной системы, в том числе на уровне выбора типа модулятора, изготовления ВРБ со специальной формой АЧХ, интегральных решений для комплексного устранения влияния температурных флуктуаций. При этом стоимость типовой реализации ОЭС ИМЧР на их основе может быть в 3-4 раза меньше стоимости типовой широкополосной системы. Проанализированы перспективы развития исследований на основе применения разработанных способов для ИМЧР при многосигнальном воздействии в контуре усиления ВРМБ и достижением возможной погрешности измерений ± 20 МГц.

Результаты диссертационной работы внедрены в виде способов и ОЭС ИМЧР СВЧ-диапазона, их отдельных узлов и модулей, процедур мониторинга рабочих режимов, программно-алгоритмического обеспечения, рекомендаций по проектированию и учебно-методических материалов, что подтверждено соответствующими актами внедрения. Новизна и полезность технических решений подтверждены двумя патентами РФ на полезную модель и изобретение.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах из перечня ВАК РФ:

1. Нургазизов, М.Р. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования/ О.Г. Морозов, М.Р.Нургазизов, Т.С. Садеев [и др.]// Научно-технический вестник Поволжья. –2012. –№ 4. – С. 146-149.

2. Нургазизов, М.Р. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально-эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа / Г.И. Ильин, О.Г. Морозов, М.Р. Нургазизов[и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического

университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2(16). – С. 3-12.

3. Нургазизов, М.Р. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха-Цендера / Т.С. Садеев, О.Г. Морозов, М.Р. Нургазизов [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – №4. – С.232-236.

4. Нургазизов, М.Р. Измерение мгновенной частоты СВЧ-радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования «частота-амплитуда» в волоконной решётке Брэгга с фазовым π -сдвигом / О.Г. Морозов, М.Р. Нургазизов, П.Е. Денисенко [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 3(19). – С. 30-41.

5. Нургазизов, М.Р. Двухчастотная система измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона с температурной стабилизацией / М.Р. Нургазизов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №4(54). URL: www.science-education.ru/118-14134 (дата обращения: 01.10.2014).

Публикации в изданиях, входящих в базы Web of Science и Scopus:

6. Nurgazizov, Marat R. Instantaneous frequency measurement using double-frequency probing / Oleg G. Morozov, Marat R. Nurgazizov, Tagir S. Sadeev [et al.] // Proc. of SPIE. – 2013. – V. 8787. – P. 878708; doi:10.1117/12.2017834.

7. Nurgazizov, Marat R. Double-frequency method for the instantaneous frequency and amplitude measurement / Oleg G. Morozov, Marat R. Nurgazizov, Anvar A. Talipov // Proc. of IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'13). – 2013. – P. 381-383; doi: 10.1109/ICATT.2013.6650785.

8. Nurgazizov, Marat R. Instantaneous frequency measurement of microwave signals in optical range using “frequency-amplitude” conversion in the π -phase-shifted fiber Bragg grating / Oleg G. Morozov; Marat R. Nurgazizov; Pavel E. Denisenko [et al.] // Proc. of SPIE. – 2014. – V. 9136. – P. 91361B; doi:10.1117/12.2051126.

9. Nurgazizov, Marat R. Instantaneous microwave frequency measurement with monitoring of system temperature / Oleg G. Morozov, Marat R. Nurgazizov [et al.] // Proc. of SPIE. – 2014. – V. 9156. – P. 91560N; doi:10.1117/12.2054256.

Патенты Российской Федерации:

10. Пат. 102256 Российская Федерация, МПК G01K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / Морозов О.Г., Садеев Т.С., Нургази-

зов М.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ПГУТИ. №2010137130/28; заявл. 06.09.2010; опубл. 20.02.2011, Бюл. №5.

11. Пат. 2495380 Российская Федерация, МПК G01K 11/32. Способ измерения параметров физических полей / Морозов О.Г., Садеев Т.С., Нургазизов М.Р. [и др.]; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ПГУТИ. №20101339098/28; заявл. 22.09.2010; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28.

Труды и материалы международных научно-технических конференций:

12. Нургазизов, М.Р. Задача повышения чувствительности волоконно-оптических биосенсоров и варианты ее решения / О.Г. Морозов, О.А. Степушенко, М.Р. Нургазизов [и др.] // Труды IX МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – Челябинск: Изд-во ЧелГУ. – 2010. – С. 137.

13. Нургазизов, М.Р. Измерение мгновенной частоты и амплитуды неизвестных СВЧ-сигналов с помощью двухчастотного зондирования / О.Г. Морозов, Т.С. Садеев, М.Р. Нургазизов // Труды XI МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – Екатеринбург: Изд-во УрГУ. – 2012. – С. 113-115.

14. Нургазизов, М.Р. Двухчастотный метод нахождения мгновенной частоты СВЧ-сигналов / О.Г. Морозов, Т.С. Садеев, М.Р. Нургазизов [и др.] // Материалы X МНТК «Оптические технологии телекоммуникаций». – Уфа: Изд-во УГАТУ. – 2012. – С. 305-307.

15. Nurgazizov, M.R. Microwave technologies in industry, living systems and telecommunications / G.A. Morozov, O.G. Morozov, M.R. Nurgazizov [et al.] (на англ. яз.) // Материалы XI МНТК «Оптические технологии телекоммуникаций». – Самара: Изд-во уч. и науч. лит-ры ПГУТИ. – 2013. – С. 93-97.

16. Нургазизов, М.Р. Фотонная система измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона с температурной стабилизацией / О.Г. Морозов, М.Р. Нургазизов // Труды XII МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». – Самара: Самарское книжное изд-во. – 2014. – С. 162-164.

Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Формат 90x64_{1/16}
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.