МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ)

На правах рукописи

Иконников Владимир Николаевич

МИКРОВОЛНОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ

Специальность 1.3.4 - «Радиофизика»

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

> Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, доцент В.А. Канаков

Нижний Новгород, 2021

оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Методы микроволнового зондирования динамических объектов 11	1
1.1 Принципы микроволновой интерферометрии11	1
1.2 Обзор техники радиоинтерферометрических измерений 18	8
1.3 Принципы микроволновой радиометрии 23	3
1.4 Обзор техники радиометрических измерений 30)
Выводы	5
Глава 2 Активно-пассивное микроволновое зондирование газодинамических	
процессов	5
2.1 Проблемы создания комплекса активно-пассивного зондирования	
газодинамических процессов 36	5
2.2 Калибровка радиометрического канала	3
2.3 Обработка данных радиометрических измерений	7
2.4 Экспериментальная отработка методик)
	1
т лава 5. Восстановление профиля температуры фронта оыстропротекающего	1
процесса по измерительным данным многоканального радиометра	l
3.1 Многоканальное микроволновое зондирование быстропротекающих	
процессов	1
3.2 Математическое описание задачи	1
3.3 Случаи бесконечно узких диаграмм направленности	5
3.4 Случай произвольных диаграмм направленности	5 0
5.5 Оценка величины ошиоки аппроксимации	ן 7
Глава 4. Многоканальная радиоинтерферометрическая система для измерения	/
динамических параметров конструкций	8
4 1 Залача контроля линамических параметров элементов конструкций 78	8
4.2 Многоканальная система на основе набора двухпозиционных СВЧ	5
интерферометров	2
4.3 Контрольно-измерительное оборудование и погрешности измерений 91	1
4.4 Модельные эксперименты	5
Выводы104	4
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ107	7
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	8
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА 122	2
Приложение А 126	5

введение

Микроволновое зондирование – эффективный метод экспериментального исследования разнообразных физических объектов и сред, широко используемый как в системах большой дальности (например, в дистанционном зондировании Земли, атмосферы и космических объектов), так и в системах малой дальности: медицинской средствах неразрушающего контроля, диагностики И т.д. пассивные Существуют как активные, так И системы микроволнового наиболее информативными зондирования, при этом являются системы, сочетающие в себе активные и пассивные измерения [1].

Главные достоинства микроволнового метода зондирования бесконтактный невозмущающий характер измерений, непрерывность, ИХ позволяюшая проводить диагностику реальном времени, В высокая точность, a также возможность определения внутренней потенциальная структуры объектов и сред, прозрачных для зондирующего излучения. В связи с упомянутыми преимуществами методы и технические средства микроволнового зондирования активно развиваются, однако они не являются универсальными и должны быть адаптированы с учетом специфики исследуемых объектов и условий зондирования.

Исследование сложных динамических объектов методами микроволнового зондирования имеет ряд особенностей. Под *сложными динамическими объектами* будем понимать объекты, находящиеся под воздействием переменных внешних или внутренних сил и характеризующиеся несколькими изменяющимися во времени параметрами. Необходимость одновременной регистрации ряда различных характеристик таких объектов, как правило, требует задействования нескольких активных и/или пассивных измерительных каналов.

В ряде случаев специфика исследования требует использования систем микроволнового зондирования (СМЗ) малой дальности. В настоящей работе под *малой дальностью* будем понимать случай, когда расстояние от СМЗ до объекта сопоставимо с характерными размерами объекта, либо существенно меньше их.

При этом малые перемещения объекта будут оказывать существенное влияние на условия зондирования [2]. Данное обстоятельство является характерной особенностью всех решаемых в работе задач.

Одним из примеров сложных динамических объектов являются фронты ударно-волновых и детонационных процессов. Для измерения кинематических параметров (перемещение, скорость и т.д.) таких объектов широко применяется радиоинтерферометрический метод [3, 4]. Также большой интерес представляют термодинамические характеристики таких объектов – объем, давление и температура [5]. Для дистанционного измерения температуры удаленного объекта применяется метод радиометрии, то есть измерение его яркостной температуры с помощью широкополосного приемного устройства. Для установления связи яркостной и термодинамической температур объекта необходимо параллельно с измерением яркостной температуры оценивать поглощающие свойства поверхности [6]. Поэтому для получения полной информации о кинематических и термодинамических требуется параметрах газодинамического процесса реализация комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования, сочетающего в себе интерферометрический и радиометрический измерительные каналы. Специфика данной задачи обусловлена малой дальностью зондирования и заключается в том, что фронт детонационной волны в ходе процесса быстро приближается к антенне СМЗ. Значительный рост амплитуды отраженного от объекта сигнала влияет на характеристики приемного канала радиометра, поэтому актуальна задача калибровки радиометрического канала в присутствии мощной переменной внутрисистемной помехи.

В случае, если необходимо исследовать характеристики сложного динамического объекта в нескольких пространственных измерениях, необходимо использование нескольких измерительных каналов. В частности, для реконструкции формы объектов при быстропротекающих газодинамических процессах применяется многоканальная радиоинтерферометрия [7]. Однако методы восстановления закона распределения температуры по поверхности газодинамического процесса на основе измерительных данных многоканального

радиометра в составе систем малой дальности действия в настоящее время недостаточно разработаны. Результаты многоканального зондирования С ограниченным количеством каналов требуют интерполяции измерительных данных. Зондирующее излучение микроволнового диапазона затруднительно сфокусировать в маленькое пятно во всем интервале быстрого перемещения исследуемого объекта. Влияние малой дальности зондирования заключается в том, что при приближении фронта детонации к антеннам, размеры и перекрытие областей поверхности, стягиваемых диаграммами направленности (ДН), сильно меняются. Поэтому актуальна разработка метода, позволяющего оценивать закон распределения температуры по поверхности при произвольном перекрытии ДН измерительных антенн и их произвольной ширине, не выходящей за границы объекта исследования.

Другим классом сложных динамических объектов, при исследовании которых применяются методы микроволнового зондирования, являются различные конструкции в условиях внешних воздействий. Например, для исследования динамической реакции конструкций на взрывное нагружение применяется радиоинтерферометрия [8]. Также актуальна задача контроля колебаний зданий и сооружений, вызываемых действием ветровых, сейсмических, технологических нагрузок [9]. Размещение СМЗ на независимом от здания основании в городских условиях, как правило, нецелесообразно или невозможно. СМЗ может быть реализована в виде интерферометра с двумя разнесенными приемопередающими блоками (ППБ), которые закреплены непосредственно на конструкции (фактически, на нулевой дальности от объекта) и будут иметь с ней кинематическую связь. В силу этого обстоятельства интерферометры будут регистрировать деформации объекта, а не его смещение в целом, что нужно учитывать при интерпретации экспериментальных данных. Сложная структура конструкции, каркас которой может состоять из множества секций, имеет много степеней свободы механических колебаний и требует использования системы из нескольких измерительных каналов. Таким образом, актуально исследование

возможности создания и специфики функционирования такой системы контроля колебаний конструкций.

Целью диссертации является развитие методов микроволновой интерферометрии и радиометрии на малой дальности в приложении к задачам зондирования сложных динамических объектов на примере измерения термодинамических (температура, яркостная температура) и кинематических (перемещение, скорость) параметров газодинамических процессов, а также измерения динамических параметров конструкций.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи.

1. Разработка и реализация в лабораторных условиях методики калибровки радиометрического канала в составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования, а также разработка алгоритма определения термодинамической температуры объекта на основе измерительных данных такого комплекса.

2. Разработка метода восстановления распределения температуры по поверхности близко расположенного объекта на основе данных многоканальных радиометрических измерений с учетом влияния ДН антенн.

3. Разработка и экспериментальная реализация метода измерения взаимных смещений элементов конструкции, находящейся под внешним динамическим воздействием, при помощи многоканальной радиоинтерферометрической системы (МРИС) сантиметрового диапазона длин волн.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

1. Разработана и реализована в лабораторных условиях методика калибровки радиометрического канала в составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования с разделением активного и пассивного каналов по форме спектра.

2. Разработан алгоритм определения термодинамической температуры объекта на основе измерительных сигналов комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования, в котором активное и пассивное зондирование

производится синхронно в общем частотном диапазоне, сигналы регистрируются общим приемным устройством, разделение активной и пассивной компонент сигнала проводится по форме спектра.

3. Разработан метод восстановления двумерного поля температуры фронта быстропротекающего газодинамического процесса посредством сплайнаппроксимации результатов измерения многоканальным радиометром с весовыми коэффициентами, определяемыми ДН антенн.

4. Разработан и экспериментально реализован метод непрерывных измерений взаимных смещений элементов конструкции зданий и сооружений в широком диапазоне частот и скоростей при помощи МРИС на основе интерферометров сантиметрового диапазона с двумя разнесенными ППБ.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем.

1. Реализована лабораторных калибровки В условиях методика радиометрического канала В составе комплекса активно-пассивного переменной микроволнового зондирования присутствии мощной В внутрисистемной помехи.

2. Разработано программное обеспечение для определения термодинамической температуры газодинамического процесса на основе данных трехмиллиметрового радиоинтерферометра-радиометра. Измерение термодинамической температуры в сочетании с измерением перемещения фронта газодинамического процесса позволяет экспериментально оценить параметры уравнения состояния охваченного процессом вещества.

3. Предложен метод сплайн-аппроксимации двумерного поля яркостной температуры фронта быстропротекающего газодинамического процесса, учитывающий влияние ДН антенн многоканального радиометра и обладающий более высокой точностью по сравнению с существующими.

4. Предложенный метод регистрации собственных и вынужденных колебаний конструкций, а также их статических деформаций может быть

использован при создании новых систем непрерывного мониторинга технического состояния зданий и сооружений и оценки их остаточного ресурса на основе анализа полной истории динамических воздействий на элементы конструкций.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанные методика калибровки радиометрического канала и алгоритм определения термодинамической температуры позволяют использовать интерферометр трехмиллиметрового диапазона для синхронного активнопассивного микроволнового зондирования в общем частотном диапазоне.

2. Метод восстановления двумерного поля температуры фронта быстропротекающего процесса посредством сплайн-аппроксимации результатов измерения многоканальным радиометром с учетом влияния ДН антенн обладает более высокой точностью по сравнению со сплайн-интерполяцией, проводимой без учёта влияния ДН антенн, что позволяет сократить количество измерительных каналов.

3. МРИС на основе интерферометров сантиметрового диапазона с двумя разнесенными ППБ позволяет непрерывно регистрировать собственные и вынужденные колебания конструкций в широком диапазоне частот и скоростей смещения, а также статические деформации элементов каркаса зданий и сооружений с погрешностью не хуже 0,1 мм.

4. Набор интерферометров трехмиллиметрового диапазона, расположенных на независимом основании, позволяет контролировать сложные перемещения (совокупность поступательных, вращательных движений и деформаций) элементов конструкций зданий.

Методы исследования и достоверность результатов. Результаты диссертации получены при помощи методов статистической радиофизики, радиофизических измерений, цифровой обработки сигналов и теории погрешностей. Достоверность полученных выводов подтверждается согласованностью теоретических расчетов и результатов компьютерного моделирования с данными экспериментальных исследований.

Апробация и внедрение результатов. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе один патент на изобретение, 6 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК, 5 – в сборниках трудов международных конференций. Список публикаций соискателя по теме диссертации приведен в конце диссертации. Результаты диссертационной работы были использованы в РФЯЦ-ВНИИЭФ исследовательской деятельности при постановке газодинамических экспериментов и обработке экспериментальных данных, а также в научно-исследовательских работах Нижегородского государственного Н.И. Лобачевского [10]. университета им. Акт внедрения результатов диссертации в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ НИИИС им. Ю.Е. Седакова приведен в приложении А.

Личный вклад соискателя. Все представленные в работе результаты получены лично соискателем или при его непосредственном участии. Соискатель принимал участие в разработке методики калибровки радиометрического канала и термодинамической алгоритма определения температуры, проводил лабораторные эксперименты по ее реализации, является соавтором программного обеспечения для обработки данных газодинамических экспериментов. Соискатель принимал участие в разработке метода сплайн-аппроксимации двумерного поля яркостной температуры, учитывающего влияние ДН зондирующих антенн, и проводил компьютерное моделирование данного метода при различных тестовых распределениях температуры. Соискатель принимал участие в разработке и колебаний аппаратуры экспериментальных исследований изготовлении конструкций, лабораторных постановке экспериментов, является автором программного обеспечения для сбора и обработки данных МРИС.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 118 наименований. Первая глава диссертации представляет собой обзор методов и техники микроволнового дистанционного зондирования динамических объектов. Во второй главе обсуждается реализация радиометрического канала в составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования быстропротекающих газодинамических процессов, предложены И экспериментально апробированы методика калибровки радиометрического канала и алгоритм обработки измерительного сигнала. В третьей главе предлагается многоканальной радиометрии, позволяющий метод оценивать закон распределения температуры поверхности объекта ПО при произвольном перекрытии ДН антенн радиометра и их произвольной ширине, не выходящей за исследуемого пределы объекта, приводятся результаты математического моделирования ланного метола. В четвертой главе обсуждается экспериментальная реализация методики непрерывных измерений взаимных смещений элементов конструкций при помощи МРИС сантиметрового диапазона длин волн. В заключении излагаются основные результаты проведённых исследований.

Общий объём диссертации составляет 127 страниц, из них основной текст 106 страниц, библиографический список – 17 страниц. Работа содержит 35 рисунков, 6 таблиц.

Глава 1. Методы микроволнового зондирования динамических объектов

Для исследования объектов окружающей среды широко используются различные методы дистанционного зондирования. В зависимости от способа получения информационного сигнала, методы подразделяются на активные или пассивные. В случае активного зондирования, излученный измерительной системой зондирующий сигнал отражается от исследуемого объекта и попадает в приемник. Пассивное зондирование основано на приеме собственного радиоизлучения исследуемого объекта [11, 12]. В настоящей главе в части активных методов пойдет речь о микроволновой интерферометрии, в части пассивных методов – о микроволновой радиометрии.

Кроме того, методы дистанционного зондирования различаются по дальности действия. Далее обсуждаются методы малой дальности, позволяющие исследовать форму и внутреннюю структуру объектов.

1.1 Принципы микроволновой интерферометрии

Для измерения кинематических параметров динамических объектов и, в частности, для исследования быстропротекающих процессов движения используется метод микроволновой интерферометрии. Его физический принцип аналогичен интерферометрии в оптическом диапазоне: сравнивается фаза опорной и отраженной от объекта электромагнитной волны. При этом он обладает более высокой степенью пространственной когерентности. Это позволяет проводить измерения на значительно более длинных участках раздельного прохождения лучей. Информативными параметрами настоящего метода могут являться фазовый сдвиг между падающей и отражённой волнами, доплеровский сдвиг отраженной волны.

Рассмотрим принцип метода микроволновой интерферометрии на примере радиоинтерферометра, построенного по схеме супергетеродинного приемопередатчика (рисунок 1.1.1). В настоящее время такая схема применяется на практике при создании систем диагностики быстропротекающих динамических процессов на малой дальности [8, 13, 14]. По принципу супергетеродина выполнены все используемые в данной работе системы микроволнового зондирования.

В состав радиоинтерферометра входят блок приемопередатчика (ПП), блок фазовых детекторов (ФД) и регистратор данных (Рег). Блок ПП состоит из генератора гармонических колебаний микроволнового диапазона (Г), гетеродина (Гет), отстроенного от генератора на фиксированную величину промежуточной частоты (ПЧ), направленного ответвителя (НО), делителя мощности (ДМ), балансных смесителей (С1, С2), конструктивно объединенных с усилителями промежуточной частоты (УПЧ). К выходу и входу блока ПП подключены соответственно передающая и приемная антенны (А1, А2). Высокочастотные элементы схемы соединяются волноводными трактами. Антенны интерферометра направлены на исследуемый объект (О), при этом среда между антеннами и объектом должна быть прозрачной для зондирующего излучения.



Рисунок 1.1.1 – Структурная схема микроволнового интерферометра

Генератор Г создает непрерывные гармонические колебания фиксированной мощности на заданной частоте. Зондирующий сигнал излучается передающей антенной A1 в направлении объекта, при этом часть мощности через HO поступает на смеситель C1.

При наличии на пути зондирующего излучения объекта с диэлектрической проницаемостью, отличной от диэлектрической проницаемости среды, происходит отражение или рассеяние излучения. Часть энергии волны, отраженной от объекта, поступает в приемную антенну A2 и далее на вход смесителя C2. Смесители, на входы которых также поступает сигнал гетеродина, формируют сигналы ПЧ: опорный U_o на выходе C1 и информационный U_u на выходе C2.

В блоке ФД происходит перенос сигнала ПЧ в базовую полосу частот, в результате чего формируется сигнал, называемый интерферограммой, имеющий частоту, равную разности частот принятых и излученных интерферометром колебаний. Фазовое детектирование может проводиться как в цифровой, так и в аналоговой форме.

Преимуществом радиоинтерферометра, построенного по схеме супергетеродинного приемопередатчика, является тот факт, что принятый сигнал в данной схеме усиливается на достаточно высокой ПЧ, существенно большей максимального доплеровского сдвига частоты. Поскольку сигнал ПЧ является узкополосным, УПЧ не вносит в него значительных амплитудно-фазовых искажений [8, 13].

Далее интерферограмма обрабатывается – вычисляются её текущая фаза и мгновенная частота как функции времени. Обработка интерферограммы может производиться как в реальном времени, так и после эксперимента.

Текущая фаза интерферограммы И мгновенная частота связаны соответственно с перемещением и мгновенной скоростью исследуемого объекта, что обусловлено эффектом Доплера. В приближении зондирующего излучения плоской монохроматической волной для поступательно движущегося объекта, вывести ЭТУ связь уравнения текущей фазы плоской можно ИЗ

отраженной волны $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \omega_0 t - kx \tag{1.1.1}$$

В этом уравнении ω_0 – циклическая частота падающей волны, t – текущее время, $k = 2\pi n/\lambda$ – волновое число падающей волны, n – показатель преломления среды, в которой движется объект, λ – длина волны в свободном пространстве.

Расстояние от антенны до объекта в момент времени *t* определяется как $x = x_0 + 2V \cos \alpha t$, где x_0 – начальное расстояние от антенны до объекта, V – модуль скорости движения объекта, α – угол между вектором скорости объекта *V* и волновым вектором падающей волны *k* (вектором визирования).

Из уравнения (1.1.1) следует, что приращение фазы $\Delta \phi$ за время Δt равно

$$\Delta \varphi = \varphi_0 - 4\pi n V \Delta t \cos \alpha / \lambda \tag{1.1.2}$$

где $\phi_0 = \omega_0 \Delta t$ — приращение фазы опорного сигнала. Следовательно, проекция вектора перемещения объекта на вектор визирования равна

$$V\Delta t \cos \alpha = -(\Delta \varphi - \omega_0 \Delta t) \frac{\lambda}{4\pi n}, \qquad (1.1.3)$$

а средняя на интервале Δt проекция вектора скорости объекта на вектор визирования равна

$$V\cos\alpha = -(\Delta\varphi/\Delta t - \omega_0)\frac{\lambda}{4\pi n},$$
(1.1.4)

где $\Delta \phi / \Delta t = \omega(t)$ – мгновенная частота принятого сигнала, а разность частот $\{\omega(t) - \omega_0\} = \Omega(t)$ – доплеровское смещение частоты принятого радиоинтерферометром сигнала относительно частоты зондирующего излучения.

Следует отметить, что для вычисления параметров движения исследуемого объекта необходимо знать показатель преломления среды, в которой движется объект, на частоте зондирующего излучения.

Необходимо учитывать, что радиоинтерферометр может определить только модули проекций векторов перемещения и скорости объекта на вектор визирования. Знаки проекций не могут быть определены по единственному сигналу интерферограммы, поскольку физически измеряемая частота является положительно определенной величиной. Чтобы определить, приближается объект к антенне радиоинтерферометра или удаляется от нее, нужно сравнивать фазу принимаемого сигнала с двумя опорными квадратурными сигналами, фазы которых отличаются на $\pi/2$, например $\cos\omega_0 t$ и $\sin\omega_0 t$. Такая пара сигналов образует комплексный аналитический сигнал. В случае приближения объекта к антенне, фаза принятого сигнала опережает фазу излученного сигнала, а полученные действительная и мнимая части комплексной интерферограммы пропорциональны $\cos\Omega t$ и $\sin\Omega t$. В случае удаления объекта от антенны, фаза принятого сигнала излученного сигнала, а случае приближения объекта и мнимая части комплексной интерферограммы пропорциональны $\cos\Omega t$ и $\sin\Omega t$. В случае удаления объекта от антенны, фаза принятого сигнала отстает от фазы излученного сигнала, а действительная и мнимая части интерферограммы пропорциональны сов Ωt и $\sin\Omega t$.

Важно отметить, что уравнения (1.1.1-1.1.4) справедливы для приближения падающей плоской волны на поступательно движущийся с постоянной скоростью объект. Реальная ситуация, как правило, значительно отличается от идеализированной модели, а форма интерферограмм при этом существенно отличается от гармонической, что осложняет измерение ее текущей фазы и мгновенной частоты.

Применение метода микроволновой интерферометрии в исследованиях динамических объектов имеет ряд преимуществ [2]:

- невозмущающий характер измерений;
- совместимость с другими методами исследования;
- непрерывность измерения кинематических параметров объекта;
- высокое быстродействие (до 10⁻⁸ с);
- возможность исследования оптически непрозрачных сред;
- мягкие требования к неоднородностям отражающих поверхностей (±λ/16) по сравнению с оптикой;
- высокая чувствительность к неоднородностям показателя преломления среды (единицы процентов);
- высокая точность измерения перемещений и скоростей исследуемых объектов, движущихся с плавно меняющейся скоростью (относительная

погрешность до 10-4);

- высокая разрешающая способность по скорости при движении нескольких объектов одновременно (до [λ/4πn]/[t]);
- большой диапазон измеряемых скоростей (от 10⁻⁴ до 10⁴ м/с) и перемещений (от 10⁻³ до 10 м).

Можно выделить следующие недостатки радиоинтерферометрического метода в исследованиях динамических объектов:

- сильное затухание радиоволн миллиметрового диапазона в средах с относительно слабой (от 10⁻⁷ [Ом см]⁻¹) удельной проводимостью;
- сильное рассеяние радиоволн миллиметрового диапазона на неоднородностях малого (~λ) размера;
- существенное влияние электродинамических свойств экспериментальной установки на форму интерферограммы;
- косвенный характер измерений;
- зависимость точности измерения от погрешности определения показателя преломления исследуемой среды;
- сложный алгоритм компенсации мешающего действия сигналов,
 отраженных от окружающих исследуемый объект предметов;

Радиоинтерферометр миллиметрового диапазона может быть использован для исследования различных процессов, сопровождающихся движением границ раздела различных сред, в том случае, если хотя бы одна из этих сред прозрачна для зондирующего излучения. В частности, радиоинтерферометр может применяться для исследования движения твердых тел в сплошной среде, движения фронтов ударных волн, горения, детонации и т.п. Кроме того, методом радиоинтерферометрии может быть измерено значение показателя преломления среды, в которой движется исследуемый объект, в случае если перемещение объекта измеряется независимым методом.

Важным этапом применения радиоинтерферометрического метода измерений является обработка измерительного сигнала (интерферограммы).

Параметры таких сигналов определяются, как правило, в границах ряда допущений. На практике всегда необходим учет пределов применимости математических моделей сигнала и шума.

Преобразование Фурье позволяет эффективно анализировать узкополосные интерференционные сигналы, за счет компактности их описания в частотной области. Однако при вычислении спектра необходим учет методических погрешностей вычислений, которые неизбежно возникают при конечной длительности и нецелом числе периодов измерительного сигнала [15, 16]. Для широкополосных сигналов, например, интерференционных сигналов с нелинейно изменяющейся фазой, более эффективно применение методов цифровой фильтрации непосредственно во временной области.

Влияние мультипликативного шума и фазовых искажений сигнала, возникающих при интерференции зондирующего сигнала во внутренней структуре динамического объекта, можно уменьшить при использовании преобразования Гильберта и теории аналитических сигналов [17-21].

К интерференционному сигналу вида

$$s_c(t) = s_m(t)\cos[2\pi\omega_0 t + \psi(t)] + s_n(t)$$
(1.1.5)

(здесь $s_n(t)$ – аддитивный шум, а $\psi(t)$ – флуктуации фазы) применяется преобразование Фурье с получением частотного спектра, составляющие которого центрированы относительно частот $\pm \omega_0$. Преобразование Гильберта выполняется в результате обратного преобразования Фурье удвоенной части полученного спектра только на положительных частотах. Результатом преобразования Гильберта является сопряженная компонента $s_s(t)$ в аналитическом сигнале $s(t) = s_c(t) + js_s(t)$, где $s_c(t)$ и $s_s(t)$ – квадратурные составляющие. Таким образом можно оценить фазу интерференционного сигнала (1.1.5):

$$\hat{\varphi}(t) = \pi \hat{\omega}_0 t + \hat{\psi}(t) = \operatorname{arctg}[s_c(t)/s_s(t)]$$
(1.1.6)

где значения фазы вычисляются с учётом всех частотных компонент сигнала. В случае, если квадратурные сигналы получены аппаратно, нет необходимости выполнения прямого и обратного преобразований Фурье.

В зависимости от решаемой задачи нетрудно оценить искомые параметры ω_0 или ψ путем линейной обработки данных на основе подходящего критерия. Отметим, что оценка (1.1.6) не зависит от влияния медленно изменяющейся по сравнению с функцией $\cos(2\pi\omega_0 t)$ мультипликативной помехи $s_m(t)$ в интерференционном сигнале.

Методы линейной обработки основываются на развитом теоретическом базисе, обладают высокой точностью и широкими функциональными возможностями. Однако не существует наилучшего универсального метода обработки интерферограмм. Выбор того или иного подхода зависит от вида решаемой интерферометрической задачи и следующих факторов:

- требуемая точность измерений и помехозащищенность системы;
- быстродействие регистратора и вычислительного устройства;
- наличие независимых каналов получения информации о характеристиках сигналов и внешних воздействиях;
- наличие надежных априорных оценок параметров интерференционных сигналов [22].

1.2 Обзор техники радиоинтерферометрических измерений.

Одна из первых работ по исследованию быстропротекающих динамических процессов методом микроволновой интерферометрии опубликована в 1953 г [23]. В ней описан метод измерения скорости детонации взрывчатых веществ. В работах [24, 25] описано применение эффекта Доплера для измерения скорости фронта детонации, хорошо отражающего вследствие высокой ионизации. В описанном в [25] приборе разностная частота оценивается как частота биений суммы излученного и отражённого сигнала. Источником сигнала длиной волны 3,3 см являлся клистрон. Результаты оценки скорости детонации четырёх взрывчатых веществ интерферометрическим методом как правило расходятся не более, чем на 2% с результатами, полученными контрольным методом.

В работе [26] описана похожая схема установки для измерения скорости движения автомобилей на дорогах. В статье [27] обсуждается применение интерферометра 8-миллиметрового диапазона длин волн для поиска трещин и определения скорости эрозии стенок ракетных двигателей.

Использование интерферометра 3-сантиметрового диапазона для измерения параметров ударно ионизированного воздуха описано в работе [28]. Оценивались плотность электронов, частота столкновений, диэлектрическая проницаемость, проводимость, коэффициенты поглощения и отражения. Измерения проводились при различных давлениях и скоростях ударной волны. Сигнал на частоте 9,385 ГГц подавался на два прямоугольных металлических волновода. Сквозь один из них проходила трубка с исследуемым ионизированным воздухом, на другом конце установки сигналы с двух волноводов складывались и вычитались для получения двух каналов на выходе. Диэлектрическая проницаемость была измерена с разбросом в 1,5%.

работ Олной фундаментальных области микроволновой ИЗ В интерферометрии газодинамических процессов является статья [29]. В ней описывается интерферометр, предназначенный для непрерывной регистрации движения ударных и детонационных волн и поверхностей материалов. Отмечена перспективность радиоинтерферометрического метода в связи с тем, что неизвестно точное время ионизации контактных датчиков (штырей и световодов). Представленный В работе интерферометр построен ПО двухканальной квадратурной схеме и работает на частоте 8 ГГц. Представляет интерес способ взаимодействия измерительной установки с веществом. Для регистрации детонационной образец положения ударной или волны В помещается коаксиальный микрокабель с субмиллиметровым диаметром и малой погонной массой. Этот кабель не вносит значительных искажений в ход исследуемого процесса. При этом фронт процесса, распространяясь по веществу, уничтожает или ионизирует микрокабель, постоянно перемещая положение точки отражения СВЧ-излучения. Интерферометр электрически согласован с микрокабелем, и измеряет зависимость фазы отражённого сигнала от времени, что позволяет определить положение фронта процесса и его скорость.

Одной из первых работ отечественных исследователей в области микроволновой интерферометрии является статья [30], в которой описано применение разработанного в НИИИС им. Ю.Е. Седакова 8-мм радиоинтерферометра МБИМ-08 в ВНИИТФ для исследований превращений гетерогенных взрывчатых веществ под воздействием ударной волны.

В статье [31] отмечено, что интерферометрия в СВЧ и КВЧ диапазоне является как правило единственным возможным невозмущающим методом контроля взрывчатых веществ, т.к. многие из них непроницаемы на более высоких частотах, например, в оптическом диапазоне. Экспериментальная этой работе представляла собой радиоинтерферометр, установка В подсоединенный к круглому металлическому волноводу, частично заполненному исследуемым диэлектриком. Зондирующий сигнал отражался от ударной волны, возбуждённой в диэлектрике. Во избежание отражения от невозмущённой границы вещества, была применена четвертьволновая согласующая пластинка. Доплеровская частота получалась в результате детектирования суммы опорного и отражённого В проведенных экспериментах сигналов. с помощью интерферометра с длиной волны зондирующего излучения 3,33 см определялись одновременно волновые и массовые скорости в диэлектрике, а также диэлектрическая проницаемость сжатого вещества.

В 2007 г. был разработан и метрологически аттестован одноканальный радиоинтерферометр миллиметрового диапазона длин волн. Этот прибор обеспечил измерение перемещений фронтов ударных и детонационных волн с погрешностью не более 0,4 мм [32]. Полученная точность была достигнута благодаря предложенным техническим решениям в каждой из трех подсистем радиоинтерферометра: приемопередающей, подсистеме обработки измерительной информации и антенно-фидерной подсистеме.

Приемопередатчик радиоинтерферометра построен по супергетеродинной схеме (рисунок 1.1.1) с двухканальной квадратурной регистрацией выходных интерференционных сигналов. Передатчик и гетеродин выполнены на основе

синтезаторов с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ). Синтезаторы частоты работают по принципу преобразования частот сантиметрового диапазона до требуемых частот миллиметрового диапазона при помощи умножителей на лавинно-пролетных диодах (ЛПД) с высокой кратностью преобразования при синхронизации от кварцевого генератора 100 МГц. Это обеспечивает требуемый уровень выходной мощности сигнала при достаточно низком уровне фазовых шумов.

Волноводная подсистема содержит протяженный гибкий тракт для связи приемопередатчика радиоинтерферометра с исследуемым объектом и облучатель, формирующий требуемое излучение. В качестве фидерного тракта используется диэлектрический волновод (ДВ), обеспечивающий погонные потери не более 2 дБ/м без заметных фазовых искажений и дополнительных потерь при изгибах не менее 20λ [33].

В работе [34] приведены результаты работы по созданию и лабораторным испытаниям радиоинтерферометра 3-мм диапазона, предназначенного ЛЛЯ бесконтактной регистрации биологических ритмов человека и животных. Данный прибор [14] отличается тем, что линии передачи и ответвители выполнены на основе ДВ; это позволило существенно удешевить и упростить его конструкцию. Кроме того, радиоинтерферометр обладает пониженной мощностью, что позволяет безопасно применять его для диагностики живых объектов. При помощи прибора регистрировались малые перемещения поверхности тела, обусловленные суперпозицией дыхательного И сердечного ритмов. Экспериментальные измерения верифицировались с помощью портативного ЭКГ. Авторами было показано, что точность регистрации частоты сердечных сокращений спокойно сидящего на стуле человека лежит в диапазоне 93...98% в зависимости от направления и области зондирования тела.

В статье [35] обсуждаются методы применения радиоинтерферометра 3миллиметрового диапазона при исследованиях откольной прочности различных металлов. Для проверки работоспособности методики были проведены эксперименты по ударному нагружению образцов из алюминиевого сплава Д16Т.

С помощью интерферометра определялась скорость движения свободной поверхности образца при выходе на нее волны нагрузки. По профилю скорости свободной поверхности определялась откольная прочность исследуемого материала. Результаты исследования хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными другими авторами с использованием иных методов.

Помимо измерения одномерных параметров движения газодинамических объектов. выполняемым одноканальным радиоинтерферометром, важно исследование формы диагностируемого объекта и динамики ее изменения при газодинамических процессах. Решение задачи восстановления формы объекта при движении возможно осуществить определением ограниченного числа его параметров, описывающих форму объекта с достаточной точностью. В статьях [7,36] обоснована возможность восстановления поля перемещений движущейся поверхности по результатам измерения скоростей движения десяти локальных областей поверхности И определены требования К многоканальному радиоинтерферометру. Вопросу выбора облика антенно-фидерной системы многоканального радиоинтерферометра посвящена работа [37]. Разработка такого прибора завершена в 2013 г. [4].

В [38] была предложена конструкция интерферометра сантиметрового диапазона длин волн с двумя приемопередающими блоками, принцип работы которого основан на сравнении фаз электромагнитных колебаний, излучаемых навстречу друг другу. Такая схема позволила увеличить дальности действия по сравнению с традиционной конструкцией, в которой происходит сравнение фаз зондирующего и отраженного от исследуемого объекта сигналов. В 4 главе обсуждается базе интерферометра диссертации реализация на этого многоканальной радиоинтерферометрической системы для измерения смещений элементов конструкций. Описывается эксперимент по регистрации собственных и колебаний, деформаций вынужденных a также статических элементов конструкций при помощи МРИС, произведено сравнение с показаниями контрольной представляющей собой набор аппаратуры, миллиметровых интерферометров [14].

1.3 Принципы микроволновой радиометрии

Термодинамическая температура И давление являются основными характеристиками равновесного состояния вещества. При исследовании динамических процессов в веществе наиболее важно знание временных и пространственных распределений температуры и давления. Непрерывные измерения параметров газодинамических процессов могут быть реализованы с помощью дистанционного зондирования области пространства, охваченной процессом, в миллиметровом диапазоне длин волн.

Объем области пространства, охваченной газодинамическим процессом, помощью интерферометра измеряется С непосредственно по величине перемещения фронта процесса. Давление во внутренних областях исследуемого вещества по интерферометрическим данным может быть оценено только косвенно по связи плотности вещества с его диэлектрической проницаемостью и по связи давления и температуры через уравнение состояния [5, 39]. Поэтому очень важно получать адекватную оценку температуры. Термодинамическую температуру исследуемого объекта с высоким временным разрешением можно оценить только путем измерения его яркостной температуры с помощью радиометра.

Рассмотрим основные определения, закономерности и характеристики, описывающие тепловое электромагнитное излучение [6, 40, 41]. Тепловое электромагнитное излучение присуще всем физическим телам, имеющим температуру выше абсолютного нуля. Оно связано с тепловым движением электрически заряженных частиц тела И находится В локальном термодинамическом равновесии с веществом внутреннего – не осуществляющего лучистый теплообмен с внешним пространством – объема тела, если температура тела постоянна. Оно имеет непрерывный спектр во всем диапазоне частот, случайные поляризацию и направление распространения, нормальное с нулевым средним распределение вероятности мгновенных значений поля с дисперсией, прямо пропорциональной мощности излучения (Р).

Если тело поглощает все падающее на него излучение (абсолютно черное тело – AЧТ) и имеет постоянную температуру T, то оно должно излучать такую же энергию, что и поглощает. Если же тело поглощает лишь часть энергии падающего на него излучения, определяемую коэффициентом поглощения тела ε , то оно излучает в ε раз меньшую энергию, чем АЧТ при той же температуре.

Мощность теплового излучения для АЧТ распределена по частоте в соответствии с формулой Планка:

$$\frac{dP}{df} = \frac{2\pi h f S}{\lambda^2 \left[exp\left(\frac{hf}{k_B T}\right) - 1 \right]},\tag{1.3.1}$$

где f – частота излучения, h – постоянная Планка, S – площадь излучающей поверхности, λ – длина волны, k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура излучающего тела. Максимум спектральной плотности мощности (P_f) в соответствии с законом Вина имеет место на частоте $f_{\text{max}} \approx T \cdot 10^{11}$ [Гц]. Для частот много меньших f_{max} , когда справедливо ($hf \ll k_B T$), формула Планка удовлетворительно аппроксимируется формулой Релея – Джинса

$$\frac{dP}{df} = \frac{2\pi k_B TS}{\lambda^2},\tag{1.3.2}$$

причем в достаточно узкой полосе частот спектральную плотность мощности можно считать постоянной [6].

АЧТ как источник теплового излучения можно характеризовать его яркостью (*B*), соответствующей мощности теплового излучения с единицы площади плоской поверхности источника в единицу телесного угла окружающего пространства по направлению нормали к элементу поверхности в единице полосы частот. Для источника с одинаковой во всех направлениях яркостью (закон Ламберта) в приближении Релея – Джинса,

$$B = 2 k_B T / \lambda^2, \qquad (1.3.3)$$

Учитывая линейную связь яркости и температуры, для реального тела с ε <1 можно ввести понятие яркостной температуры $T_{\rm R} = \varepsilon T$, соответствующей температуре АЧТ с той же яркостью, что и рассматриваемое тело. Для поверхности непрозрачного тела справедливо соотношение ε =(1–*R*), где *R* –

коэффициент отражения по мощности от поверхности тела. Если измерять яркость реального объекта из некоторой точки внешнего пространства, то его кажущаяся яркостная температура будет определяться по соотношению

$$T_{\mathfrak{A}} = T(1-R) + T_{\Phi}R, \tag{1.3.4}$$

где T_{Φ} – яркостная температура окружающего пространства (фона). При распространении излучения в поглощающей среде, с одной стороны, приходящее от объекта излучение будет ослаблено в $e^{-\gamma l}$ раз, с другой стороны, добавится собственное тепловое излучение среды, равное $T_{\rm C} [1 - e^{-\gamma l}]$. Здесь $T_{\rm C}$ – физическая температура среды, γ – погонный коэффициент поглощения в среде, l – оптическая длина трассы распространения радиоволн. Таким образом, в точке наблюдения яркостная температура объекта будет восприниматься как

$$T_{\mathfrak{A}} = [T(1-R) + T_{\Phi}R] e^{-\gamma l} + T_{C} [1-e^{-\gamma l}].$$
(1.3.5)

Отсюда следует, что яркостная температура различных тел с одинаковой физической температурой будет зависеть от их диэлектрических характеристик и формы поверхности, а также от направления распространения и поляризации измеряемого излучения, расстояния от объекта до точки наблюдения, яркостной температуры фона, температуры и характеристик поглощения среды распространения.

Измерения яркостной температуры источников теплового излучения проводятся с помощью радиометров – приемников шумового радиоизлучения заданного диапазона частот. Входным сигналом радиометра является шумовое излучение, поступающее с приемной антенны. Радиометр измеряет среднюю мощность входного сигнала, спектральная плотность которой в приближении Релея – Джинса пропорциональна шумовой температуре антенны и постоянна в полосе приема, сравнивая ее с сигналом опорной согласованной ($\varepsilon = 1$) нагрузки с известной физической температурой. Измерения яркостной температуры опорной нагрузки строятся таким образом, чтобы можно было полагать ее равной физической температуре.

Антенная шумовая температура (T_A) равна температуре согласованной нагрузки на входе приемника, создающей входной шумовой сигнал той же мощности, что и антенна. Она определяется потерями антенны (обычно малыми) и шумовым излучением внешних источников. Учитывая свойства направленности антенных систем и пренебрегая собственным тепловым излучением антенны, можно записать:

$$T_A = \frac{1}{\Omega_A} \int_{4\pi} T_{\mathcal{H}}(\Omega) F(\Omega) d\Omega, \qquad (1.3.6)$$

где $T_{\rm R}(\Omega)$ – угловое распределение яркостной температуры в окружающем пространстве, $F(\Omega)$ – ДН по мощности приемной антенны, $\Omega_{\rm A}$ – телесный угол, стягиваемый главным лепестком ДН антенны, 4π [стер] – телесный угол полной сферы окружающего пространства.

В зависимости от расстояния от источника сигнала до измерительной антенны, угловых размеров источника (Ω_0) и Ω_A , возможны различные варианты связи антенной температуры с яркостной температурой объекта. Если, например, $\Omega_0 >> \Omega_A$, т.е. практически весь главный максимум ДН антенны перекрыт исследуемым объектом, T_A равна средней по главному лепестку ДН кажущейся яркостной температуре источника. В случае контактных измерений, т.е. когда в качестве антенны радиометра используется отрезок входного тракта, входной конец которого соприкасается с поверхностью исследуемого объекта, соотношения для яркостной и антенной температур упрощаются. Пренебрегая потерями во входном тракте радиометра, можем положить $\gamma = 0$. Тогда

$$T_A = T(1-R) + T_{\text{pag A}}R, \qquad (1.3.7)$$

где под *R* понимаем коэффициент отражения от сечения контакта входного тракта с поверхностью объекта, а $T_{\text{рад A}}$ – яркостная температура теплового излучения радиометра в сторону антенного входа. Из последнего соотношения видно, что результат контактных измерений яркостной температуры не содержит неопределенных параметров, присущих дистанционному методу. По известным T_A и *R* может быть легко определена физическая температура объекта, причем, если $T_{\text{рад A}}$ радиометра достаточно близка к *T*, величина *R* не имеет значения. При значительной разнице T и $T_{\text{рад A}}$ и известной T может быть определено значение R, по которому, зная волновое сопротивление входного тракта радиометра, можно определить диэлектрические характеристики исследуемого объекта.

Специфика работы радиометра как измерительного прибора определяется шумовой природой сигналов, присутствующих на его входе. Собственные шумы радиометра могут быть представлены шумом согласованного с входом радиометра сопротивления $R_{\text{вх}}$ с мощностью $k_B T_{\text{рад}} \Delta f$, где $T_{\text{рад}}$ – эквивалентная шумовая температура радиометра, Δf – полоса частот, занимаемая входным шумом, т.е. рабочая полоса частот радиометра. Так как мощность шумовых сигналов в радиометре не зависит от величины R_{вх} (требуется лишь выполнение условия согласования), в дальнейшем будем полагать $R_{\rm BX} = 1$, что фактически сведется к измерению мощности сигналов в условных единицах. При наличии шумового сигнала, принимаемого антенной, мощность входного шума будет $k_B T_{\text{вх}} \Delta f$, где $T_{\text{вх}} = (T_{\text{рад}} + T_{\text{A}})$. Возможность суммирования шумовых равна температур обусловлена статистической независимостью входного сигнала и собственных шумов радиометра, при этом дисперсии соответствующих случайных процессов, т.е. их мощности, суммируются. А так как в приближении Релея – Джинса $T_{\rm m} \sim P_f$, и для узкополосного процесса на входе радиометра можно считать, что спектральная плотность мощности постоянна, суммируются и температуры.

Для входного сигнала справедливо нормальное (гауссово) с нулевым средним распределение плотности вероятности мгновенных значений напряжения

$$W(U_{\rm BX}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\rm BX}} \exp\left(\frac{-U_{\rm BX}^2}{2\sigma_{\rm BX}^2}\right),\tag{1.3.8}$$

где $\sigma_{BX}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} U_{BX}^2 W(U_{BX}) dU_{BX} = \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} U_{BX}^2 dt = P_{BX}$ – дисперсия входного сигнала, равная средней за большое время измерений τ мощности сигнала. Для оценки величины σ_{BX}^2 могут быть использованы либо двухканальная корреляционная схема, либо одноканальная схема с квадратичным детектором и интегратором (НЧ – фильтром). Рассмотрим второй вариант. В этом случае

выходной сигнал радиометра

$$U_{\rm BMX} = \frac{1}{\tau} K_{\rm pad} \sum_{1}^{N} (U_i^2 \Delta t) = \frac{1}{N} K_{\rm pad} \sum_{1}^{N} (U_i^2), \qquad (1.3.9)$$

где τ – время интегрирования, $K_{\text{рад}}$ – коэффициент передачи ВЧ – части радиометра, U_i – статистически независимые отсчеты входного сигнала, отстоящие друг от друга на время $\Delta t = 1/\Delta f$, $N = \tau \Delta f$ – число независимых отсчетов. Сигнал на выходе радиометра в соответствии с центральной предельной теоремой имеет асимптотически (при $N \rightarrow \infty$) гауссово распределение со средним значением $\overline{U}_{\text{вых}} = K_{\text{рад}}\overline{U}_i^2 = K_{\text{рад}}\sigma_{\text{вх}}^2$, и дисперсией

$$\sigma_{\rm Bbix}^2 = \frac{K_{\rm pad}^2 \sigma_i^4}{N} = \frac{K_{\rm pad}^2 \sigma_{\rm Bx}^4}{\Delta f \tau},\tag{1.3.10}$$

Установим соответствие между шумовой температурой входного сигнала и сигналом на выходе радиометра.

$$\overline{U}_{\text{Bbix}} = K_{\text{pad}}\sigma_{\text{Bx}}^2 = K_{\text{pad}}P_{\text{Bx}} = K_{\text{pad}}k_B\Delta f(T_{\text{pad}} + T_{\text{A}})$$
(1.3.11)

$$T_{\rm BX} = T_{\rm pad} + T_{\rm A} = \frac{\overline{U}_{\rm BMX}}{K_{\rm pad}k_B\Delta f}$$
(1.3.12)

Оптимальной оценкой чувствительности радиометра будем считать такое минимальное приращение шумовой температуры на входе радиометра ΔT_{\min} , при котором изменение выходного напряжения будет не меньше его среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{вых}} = K_{\text{рад}} \sigma_{\text{вх}}^2 / \sqrt{\Delta f \tau}$. То есть

$$\Delta T_{\min} = \sigma_{\text{Bbix}} / K_{\text{pag}} k_B \Delta f = \sigma_{\text{Bx}}^2_{\min} / k_B \Delta f \sqrt{\Delta f \tau} = T_{\text{pag}} / \sqrt{\Delta f \tau}$$
(1.3.13)

 $(\sigma_{Bx}^{2}_{min})$ соответствует минимальной шумовой температуре на входе радиометра, т.е. T_{pag} и минимальному значению выходного напряжения $U_{BbIX} \min = K_{pag} k_B \Delta f T_{pag}$).

Таким образом, $T_A \in \left\{ [\overline{U}_{Bbix} - \overline{U}_{Bbix} \min] / K_{pad} k_B \Delta f \pm T_{pad} / \sqrt{\Delta f \tau} \right\}$ с вероятностью 65%.

Иначе можно записать:

$$T_A = (k\overline{U}_{\text{вых}} - b) \pm T_{\text{рад}} / \sqrt{\Delta f \tau}, \qquad (1.3.14)$$

где коэффициенты k и b зависят от $K_{\text{рад}}$, Δf , τ , $T_{\text{рад}}$ и должны определяться при калибровке радиометра.

Соотношение для ΔT_{\min} определяет так называемую «флуктуационную чувствительность идеального радиометра» с постоянными $K_{\text{рад}}$, Δf , $T_{\text{рад}}$, когда калибровочные коэффициенты k и b известны точно. В реальных приемниках, однако, эти параметры флуктуируют. Причем, обычно полоса частот и шумовая температура приемника изменяются слабо и очень медленно, так что их вариации можно учесть при промежуточных калибровках, а коэффициент передачи быстро флуктуирует достаточно по сравнению c интервалом между калибровками. Спектр флуктуаций *K*(*f*) ~ 1/*f*, т.е. шум коэффициента передачи является фликкер-шумом. С учетом статистической независимости флуктуаций $U_{\text{вых}}$ и $K_{\text{рад}}$ погрешность оценки T_{A} будет равна

$$\Delta T_{min} = \sqrt{T_{\text{pag}}^2 / \Delta f \tau + (\delta K_{\text{pag}} T_{\text{BX}})^2}.$$
(1.3.15)

Второе слагаемое в этом выражении содержит относительные флуктуации коэффициента передачи радиометра $\delta K_{\text{рад}}$ и может быть сравнимо или даже намного больше первого. Однако для быстропротекающих процессов продолжительностью не более нескольких десятков микросекунд существенно более медленными флуктуациями коэффициента передачи радиометра можно пренебречь [40].

Процедура калибровки радиометра состоит в определении коэффициентов kи b путем измерения выходных сигналов радиометра при известных шумовых температурах на его входе. Если приемник линеен, т.е. во всем динамическом диапазоне входных сигналов сохраняется линейная зависимость (1.3.14), для калибровки достаточно провести два таких измерения при двух различных T_A . При этом можно записать систему двух линейных уравнений относительно k и b:

$$T_{A1} = k \ \overline{U}_{Bbix \ 1} - b,$$

$$T_{A2} = k \ \overline{U}_{Bbix \ 2} - b.$$
(1.3.16)

Тогда при измерении неизвестной антенной температуры ТАх в уравнение

$$T_{\rm Ax} = k \ \overline{U}_{\rm BMX\,x} - b \tag{1.3.17}$$

вместо k и b можно записать соответствующую комбинацию заранее известных

 T_{A1} и T_{A2} и измеренных в процессе калибровки $\bar{U}_{Bbix 1}$ и $\bar{U}_{Bbix 2}$:

$$T_{Ax} = \left(\frac{T_{A1} - T_{A2}}{\overline{U}_{Bbix \, 1} - \overline{U}_{Bbix \, 2}}\right) (\overline{U}_{Bbix \, x} - \overline{U}_{Bbix \, 1}) + T_{A1}.$$
(1.3.18)

Таким образом, основная проблема калибровки состоит в создании эталонных источников сигналов, обеспечивающих известные значения T_{A1} и T_{A2} с точностью не хуже погрешности измерений ΔT_{min} .

При дистанционных измерениях наилучшими являются так называемые апертурные эталоны – абсолютно черные тела с известными физическими температурами, перекрывающие всю ДН антенны радиометра. Учитывая, что направленные антенны значительно ослабляют излучение, приходящее под большими углами к оптической оси антенны, для них достаточно перекрывать эталоном сектор пространства, стягивающий телесный угол главного максимума ДН. Так как для таких эталонов $\varepsilon \rightarrow 1$, т.е. $R \rightarrow 0$, влиянием фонового излучения, отраженного от поверхности эталона можно пренебречь.

При калибровке контактного радиометра, когда шумовое излучение входных цепей радиометра отражается от поверхности исследуемого объекта, целесообразно использовать в качестве эталонов тела с известной физической температурой и коэффициентом отражения *R* возможно близким к реальным исследуемым объектам. При ЭТОМ очевидно, что отличие значений коэффициентов отражений эталонов и исследуемого объекта следует учитывать при интерпретации результатов измерений. Контактные радиометры можно калибровать и по АЧТ, но тогда результаты калибровки не будут учитывать вклад собственного излучения радиометра $T_{\text{рад A}}$ в реально измеренные антенные температуры при контакте с реальным отражающим объектом [41].

1.4 Обзор техники радиометрических измерений

В настоящее время известен единственный метод бесконтактного (дистанционного) измерения температуры удаленного объекта – это измерение его яркостной температуры с помощью широкополосного приемного устройства с

большим временем накопления выходного сигнала – радиометра. Способы реализации этого метода весьма разнообразны и определяются спецификой исследуемого объекта. Определяющее значение имеют расстояние от измерительной антенны до объекта, скорость изменения характеристик объекта, диапазон изменения его испускательной способности (то есть потока энергии излучения, испускаемого за единицу времени с единицы поверхности тела [42]), электрофизические характеристики и форма его поверхности и т.п. В зависимости от перечисленных обстоятельств значительно варьируется техника радиометрии.

В работе [43] приведен обзор техники исследования быстропротекающих процессов в микроволновом диапазоне. Обсуждаются проблемы использования микроволнового диапазона для обнаружения различных объектов и определения их характеристик по испускаемому ими импульсному излучению. Примерами таких объектов могут быть воздушные космические взрывы И [44-48], молниевый разряд [49, 50], взрывы проволочек, электрический разряд в воздухе [51, 52], потоки заряженных частиц [53-69], сильные вспышки на Солнце и других звездах [70-80], плазменные и любые другие источники коротких микроволновых импульсов [81-87]. Обнаружение подобных объектов возможно в настоящее время в связи с созданием компактных высокочувствительных микроволновых радиометров с малыми временами накопления, позволяющих измерять яркостную температуру, начиная с единиц кельвин и выше.

В 1948 г. был создан первый в стране микроволновый (λ=10 см) модуляционный радиометр [88]. В 1959-60 гг. разработана серия детекторных радиометров в диапазоне 136-410 ГГц и первый супергетеродинный радиометр диапазона 230 ГГц на лампе обратной волны. Последующее развитие техники привело к созданию большого разнообразия радиометрической аппаратуры сантиметрового, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов [89, 90].

Радиометры измеряют мощность излучения, собираемого антенной в заданной полосе частот. Наиболее распространены компенсационный и модуляционный типы радиометров. В приборах первого типа напряжение на

выходе приемника компенсируется опорным постоянным напряжением (в ячейке сравнения). Тем самым компенсируется постоянная шумовая часть сигнала, и регистрируются сигнал, принятый антенной, и шумовые флуктуации. В модуляционных радиометрах приемник с помощью переключателя - модулятора периодически подключается то к антенне, то к ее эквиваленту (согласованной нагрузке или дополнительной антенне). На выходе образуется модулированный сигнал типа «меандр». В отсутствие источника полезного сигнала в поле зрения антенны высоту прямоугольных импульсов уменьшают до нуля с помощью дополнительного генератора. При появлении полезного сигнала баланс нарушается, и на выходе радиометра регистрируется сигнал, модулированный прямоугольными импульсами.

обнаружения, Для целей микроволнового мониторинга атмосферы, идентификации и диагностики источников импульсного микроволнового излучения необходимы радиометры с очень широким динамическим диапазоном и высоким временным разрешением. Радиометры с квадратичным детектором и аналоговым интегратором на выходе не обладают характеристиками, отвечающими одновременно обоим этим требованиям и являются, по сути, инерционными приборами. Характерные времена накопления составляют единицы и десятки секунд [91], а диапазон шумовых температур, как правило, узок.

Для проведения экспериментальных исследований импульсных сигналов в разработан радиометрический [51] работе был комплекс co временем интегрирования около 1 мкс, позволяющий охватить интервал измеряемых температур от 300 до 10⁶ К в 8-мм диапазоне. Комплекс содержит блок питания, блок управления, сверхвысокочастотный радиометр и регистрирующую часть. СВЧ представляет собой супергетеродинный радиометр приемник компенсационного типа, работающий на длине волны 8 мм и имеющий постоянную времени 1 мкс. Антенная система радиометра состоит ИЗ параболического зеркала с рупорным облучателем. Эффективная площадь антенны 0,12 м², угловая ширина ДН по уровню 0,5 порядка 1,4°. Основное

назначение прибора – регистрация коротких всплесков электромагнитного излучения с длительностями от 1 мкс до 0,01 с, поэтому на выходе радиометрического приемника сигнал от медленно меняющихся источников и помех отсутствует (нет постоянной составляющей).

Во второй части обзора [43] рассматриваются эксперименты, в которых с помощью описанного импульсного радиометра регистрировалось микроволновое импульсное излучение. Bo всех описанных экспериментах проводились контрольные экранированным опыты с полностью ВХОДОМ антенного волноводного тракта, при этом в регистрируемых сигналах импульсная компонента отсутствовала.

В работах [50, 51, 91] экспериментально получены зависимости спектральной плотности мощности микроволнового излучения от времени при электрическом взрыве медных проволочек. Кроме того, представлена зависимость спектральной плотности мощности микроволнового излучения от времени при высоковольтном электрическом разряде между плоской поверхностью и пластинчатым электродом, почти касающимся этой поверхности.

Таким образом, в обзоре [43] не только показана возможность применения микроволновых радиометров для регистрации импульсного микроволнового излучения и исследования быстропротекающих газодинамических процессов, но и приведены конкретные примеры реализации аппаратуры и методик измерения.

Реализации различных способов активно-пассивного зондирования также посвящено множество публикаций, например, [93-114]. Различные технические решения, предлагаемые для исследования объектов различной природы, предусматривают все возможные способы разделения сигналов активного и пассивного каналов: в пространстве, по времени, по уровню, по поляризации, по диапазону длин волн, по форме сигнала и по форме спектра. Однако для активнопассивного зондирования быстропротекающих газодинамических процессов, компактно локализованных в пространстве и времени, пригодным остается только разделение сигналов по форме спектра.

Остается актуальным вопрос об измерении испускательной способности

исследуемых объектов. Для адекватного пересчета яркостной температуры динамического объекта в его термодинамическую температуру измерения яркостной температуры и испускательной способности должны проводиться одновременно в общем диапазоне длин волн.

В статье [4] отмечено перспективное направление развития техники микроволнового дистанционного зондирования газодинамических процессов: совмещение в одном измерительном комплексе функций измерения параметров движения, яркостной температуры и коэффициента отражения исследуемых объектов. Этой теме посвящена 2 глава настоящей работы.

Кроме того, недостаточно разработанным является вопрос измерения закона распределения температуры по поверхности быстропротекающего динамического процесса. Для этого очевидно, требуется несколько измерительных каналов. Хорошо известны многоканальные методы измерения яркостной температуры распределённых источников с малыми угловыми размерами и получения их двумерных радиоизображений в случае, когда ДН каждого элемента антенной решётки радиометрического комплекса охватывает объект исследования полностью (интерферометрия), либо когда антенна может двигаться (апертурный синтез) [40, 97, 114, 115]. Существенной здесь является возможность одновременного охвата каждой части объекта исследования несколькими антеннами. Другой подход к восстановлению распределения температуры по поверхности может состоять в измерении температуры в нескольких точках и последующей интерполяции. Под измерением в точке подразумевается измерение в малом пятне, температуру в котором можно считать постоянной. Для проведения таких измерений следует фокусировать излучение (радиовидение) [116].

В 3 главе диссертации обсуждается метод многоканальной радиометрии, позволяющий оценивать закон распределения температуры по поверхности при произвольном перекрытии ДН измерительных антенн и их произвольной ширине, не выходящей за пределы объекта исследования.

Выводы

В первой главе диссертации представлен обзор методов микроволнового дистанционного зондирования динамических объектов на малой дальности, а именно интерферометрии и радиометрии.

Описана структурная схема супергетеродинного радиоинтерферометра, на его примере рассмотрен принцип микроволновой интерферометрии, отмечены преимущества и недостатки радиоинтерферометрического метода в исследовании динамических объектов. Рассмотрены история развития и современное состояние техники интерферометрических измерений объектов на малой дальности. Обсуждается применение многоканальной интерферометрии для исследования динамических параметров сложных объектов.

Рассмотрены принципы микроволновой радиометрии, основные характеристики теплового электромагнитного излучения, обсужден вопрос калибровки радиометров. Приведен обзор техники радиометрических измерений быстропротекающих процессов и экспериментальных исследований динамических объектов при помощи радиометров.

Отмечены актуальные направления развития методов микроволновой радиоинтерферометрии и радиометрии на малой дальности в приложении к задачам зондирования сложных динамических объектов: совмещение в одном измерительном комплексе функций измерения параметров движения, яркостной температуры и коэффициента отражения динамических объектов, разработка метода восстановления закона распределения температуры по поверхности быстропротекающего динамического процесса, a так же реализация радиоинтерферометрической многоканальной системы измерения для динамических параметров конструкций. Решению ЭТИХ задач посвящены дальнейшие главы диссертации.

Глава 2 Активно-пассивное микроволновое зондирование газодинамических процессов

2.1 Проблемы создания комплекса активно-пассивного зондирования газодинамических процессов

настоящее время наблюдается тенденция к созданию комплексов B микроволнового зондирования малой дальности действия, предназначенных для решения задач, связанных с синхронной регистрацией целого ряда независимых параметров сложных динамических объектов. Характерным примером таких объектов являются фронты ударно-волновых и детонационных процессов. Наиболее значимыми параметрами газодинамических процессов считаются скорость ударной волны, скорость детонационной волны, массовая скорость вещества. Не менее актуальной является задача определения основных термодинамических параметров состояния вещества – объема, давления и температуры. Объем области пространства, охваченной газодинамическим процессом, может быть определен с помощью комплекса микроволнового зондирования непосредственно по величине перемещения фронта процесса. Давление во внутренних областях исследуемого вещества может быть оценено только косвенно: ПО связи плотности вещества с его диэлектрической проницаемостью или по связи давления и температуры через уравнение состояния [5, 39].

Таким образом, для однозначного определения термодинамических характеристик исследуемых объектов, в состав комплексов микроволнового зондирования должны входить как активные интерферометрические каналы, предназначенные для регистрации параметров движения, так и радиометрические каналы, предназначенные для измерения температуры.

На предприятиях Госкорпорации «Росатом» для исследования быстропротекающих газодинамических процессов широко используются КВЧ интерферометры разработки НИИИС им. Ю.Е. Седакова [8]. Перспективным
направлением расширения функциональных возможностей КВЧ интерферометров является их применение в качестве радиометров [4].

Особенностью газодинамических процессов является их малая длительность (менее 0,1 мс), поэтому для измерения яркостной температуры с флуктуационной чувствительностью $\Delta T_{\rm g} \sim 100$ К с разрешением по времени 1 мкс требуется, чтобы ширина полосы частот приемного устройства радиометрического канала была не менее 1 ГГц (см. формулу 1.3.15). Такая полоса обеспечивается применением в составе приемника КВЧ интерферометра широкополосных преобразователей частоты (балансных смесителей) [13]. Однако, как будет показано далее, спектр сигнала такого приемника имеет ряд особенностей, требующих учета при обработке измерительной информации.

Для измерения термодинамической температуры объекта целесообразно проводить измерение яркостной температуры и коэффициента отражения одновременно в общей полосе частот. При этом шумовая температура приемника преобразования коэффициент входного шумового его сигнала И на промежуточную частоту оказываются зависящими от переменной амплитуды отраженного от поверхности быстроперемещающегося объекта зондирующего [A1], И сохранения функциональных сигнала лля возможностей радиометрического канала требуется непрерывный контроль этих параметров.

Поэтому для решения задачи реализации радиометрического канала в составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования актуально решение следующих частных задач:

- Разработка алгоритма калибровки радиометрического канала, учитывающего нелинейность приемника относительно мощной переменной активной компоненты измерительного сигнала.
- Разработка алгоритма выделения из измерительного сигнала шумовой компоненты по форме спектра и вычисления яркостной температуры исследуемого объекта.

37

- Калибровка и измерение коэффициента отражения исследуемого объекта и вычисление его термодинамической температуры.
- 4. Экспериментальная отработка разработанных алгоритмов в лабораторных условиях и их апробация на данных газодинамического эксперимента.

2.2 Калибровка радиометрического канала

В настоящей работе экспериментальные исследования по реализации радиометрического канала в лабораторных условиях проводились на кафедре радиотехники радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского при помощи КВЧ радиоинтерферометра РИ-03/3 разработки НИИИС им. Ю.Е. Седакова. Внешний вид прибора представлен на рисунке 2.2.1. Типовая схема планируемого газодинамического эксперимента представлена на рисунке 2.2.2. Блок приемопередатчика (ПП) построен по супергетеродинной схеме (см. рисунок 1.1.1). Блок ПП формирует на своем выходе зондирующее излучение с частотой $f_{\Gamma} = 93,7 \Gamma \Gamma \mu$, которое подается на боковое плечо 10 дБ направленного ответвителя (НО), и затем, после прохождения через подключенную к нему фидерную систему, излучается приемопередающей антенной. Фидерная система представляет собой прямоугольный ДВ длиной около 2 м сечением 1×2 мм², выполненный из фторопласта, с погонным затуханием порядка 2,5 дБ/м. В качестве приемопередающей антенны используется торец прямоугольного ДВ, который вводится в непосредственный контакт с исследуемым объектом (О). Отражённое от объекта зондирующее излучение вместе с собственным тепловым излучением объекта поступает на вход балансного смесителя С2 через ту же антенну и фидерную систему. На выходе смесителей блока ПП формируются опорный сигнал ПЧ (U_o), являющийся продуктом комбинации зондирующих колебаний с выхода генератора Г и колебаний гетеродина Гет ($f_{\Gamma em} = 92,5$ ГГц), и информационный сигнал радиометрического канала (U_u) . Значение промежуточной частоты составляет $f_{\Pi \Psi} = 1200 \text{ M} \Gamma \mu$.

Во время эксперимента высокоскоростной цифровой осциллограф регистрирует опорный и информационный сигналы ПЧ, блок ФД в данных экспериментах не используется.



Рисунок 2.2.1 – Внешний вид радиоинтерферометра РИ-03/3



Рисунок 2.2.2 – Типовая схема газодинамического эксперимента

Рассмотрим особенности спектра информационного сигнала радиометрического канала U_u в пассивном и активно-пассивном режимах регистрации, т.е. при отсутствии и наличии сигнала передатчика соответственно. Данный сигнал регистрируется на выходе балансного смесителя С2 блока ПП. В состав модуля смесителя интегрирован предварительный УПЧ. Паспортная полоса рабочих частот смесителя составляет 1,5 ГГц.

В пассивном режиме регистрации на гетеродинный вход смесителя поступают колебания гетеродина на частоте $f_{\Gamma em}$ = 92,5 ГГц. На сигнальный вход поступает сигнал U_{ex} , представляющий собой тепловой шум объекта в рабочей полосе частот. Спектры данных сигналов схематически изображены на рисунках 2.2.3 a, б.



Рисунок 2.2.3 а) – Спектры сигналов на входе смесителя: сигнал гетеродина



Рисунок 2.2.3 б) – Спектры сигналов на входе смесителя: тепловой шум объекта (Δf – рабочая полоса частот УПЧ)

Амплитудный спектр сигнала U_u, полученного на выходе блока «смеситель – УПЧ» в одном из экземпляров прибора РИ-03/3 при выключенном генераторе передатчика, изображен на рисунке 2.2.4. В полосе частот от 100 до 700 МГц наблюдается подъем частотной характеристики. Данная особенность формы спектра связана с аномально высоким уровнем собственного шума балансного смесителя в рабочей полосе частот УПЧ. В полосе частот от 0,7 до 2,2 ГГц имеет место равномерная частотная характеристика. Далее на частотах свыше 2,2 ГГц имеет место спад, определяемый АЧХ входного усилителя регистратора.



Рисунок 2.2.4 – Спектр сигнала радиометрического канала в пассивном режиме

Равномерный участок спектра далее будет использоваться для измерения мощности шумов внешних источников. Таким образом, полоса анализа составляет 1,5 ГГц, а с учетом свойства аддитивного сложения шумового сигнала при приеме на зеркальном канале 3 ГГц.

В активно-пассивном режиме входной сигнал смесителя U_{ex} будет представлять собой аддитивную смесь теплового шума объекта в рабочей полосе частот блока «смеситель – УПЧ» и отраженного от объекта сигнала передатчика. Спектр сигнала на входе смесителя схематически изображен на рисунке 2.2.5. Помимо основной гармоники на рабочей частоте генератора $f_{I} = 93,7$ ГГц, в спектре сигнала присутствуют и побочные дискретные составляющие, уровень которых на рисунке 2.2.5 условно обозначен штрих-пунктирной линией. Возникновение данных компонент связано с особенностями генераторов радиоинтерферометра, выполненных основе синтезаторов на частот сантиметрового диапазона (~7 ГГц) с ФАПЧ, синхронизированных от кварцевого генератора с частотой 100 МГц. Переход на частоту 3-мм диапазона осуществляется при помощи умножителей частоты на ЛПД с кратностью умножения 13.



Рисунок 2.2.5 – Спектр сигнала на входе смесителя в активно-пассивном режиме

Спектр сигнала U_u при включенном генераторе передатчика, изображен на рисунке 2.2.6. Шумовая составляющая спектра выглядит аналогично пассивному случаю. Наиболее мощная дискретная компонента в сигнале U_u присутствует на частоте $f_{\Pi \Psi}=1,2$ ГГц и соответствует сигналу передатчика, отраженному от

объекта и пришедшего по внутренним цепям прибора. Также в спектре наблюдается гармоника зеркального канала приемника на частоте $2f_{\Pi^{q}}$. Прочие дискретные компоненты (в количестве от 20 до 50 штук для разных приборов) соответствуют комбинационным частотам, которые возникают при нелинейном преобразовании побочных гармоник на выходе генераторов в смесителе приемного устройства.



Рисунок 2.2.6 – Спектр сигнала радиометрического канала в активно-пассивном режиме

В случае газодинамического эксперимента в спектре сигнала смесителя также будет присутствовать узкополосная компонента на частоте $f_{\Pi 4}+f_{\Lambda}$, соответствующая сигналу передатчика, отраженному от быстро перемещающегося фронта детонации, где $f_{\Lambda} = \frac{2\sqrt{\varepsilon}V}{\lambda}$ – доплеровский сдвиг частоты (ε – диэлектрическая проницаемость среды, V – скорость объекта, λ – длина волны зондирующего излучения).

Таким образом, для устранения широкополосной шумовой помехи, связанной с шумами смесителя, алгоритм обработки сигналов радиометрического канала должен содержать процедуру полосовой фильтрации сигнала, в результате которой из полного спектра зарегистрированного сигнала должна выделяться полоса частот, пригодная для измерения мощности источников внешних шумов. Подавление дискретных компонент проводится путем сортировки отсчетов спектра мощности сигнала по уровню и их разделение на полезные и мешающие по признаку их значительного превышения над средним уровнем шума.

Определение яркостной температуры объекта (T) выполняется в частотной области путем усреднения отсчетов спектральной плотности мощности сигнала на ПЧ (m_i). При сохранении линейного по входному шумовому сигналу режима работы радиометрического канала они связаны следующим соотношением:

$$T = k\overline{m}_i - b \tag{2.2.1}$$

Для калибровки радиометрического канала необходимо определить аддитивную компоненту b, определяемую собственным шумом приемного устройства, *k*, который И множитель определяется коэффициентом преобразования приемника. Следует учитывать нелинейную зависимость коэффициента преобразования приемника по слабому шумовому входному сигналу относительно амплитуды активного сигнала U_a. Таким образом, задачей калибровки является определение зависимостей $k(U_a)$ и $b(U_a)$.

Схема калибровки радиометрического канала представлена на рисунке 2.2.7. К входу радиометрического канала подключена волноведущая система с направленным ответвителем. К одному из плеч НО подключен калиброванный полупроводниковый генератор шума (ГШ) с известной эквивалентной шумовой температурой T_{on} во включенном состоянии и T_{off} , равной температуре окружающей среды, в отключенном. Другое плечо НО подключено к выходу передающего генератора через аттенюатор поляризационный (АП).



Рисунок 2.2.7 – Схема калибровки радиометрического канала РИ-03/3

Первоначально аттенюатор полностью открыт. Далее ослабление A_1 вводится так, чтобы амплитуда активного сигнала U_a достигла уровня $U_{a max}$, соответствующего исчезновению нелинейных искажений в форме сигнала активного канала. Далее фиксированные уровни ослабления A_j выбираются такими, чтобы получать ряд значений U_a от максимального $U_{a max}$ до 0,01 $U_{a max}$. Для каждого выбранного значения A_j дважды производится регистрация сигнала на ПЧ – с включенным и отключенным ГШ. Длительность выборки определяется требуемым временным разрешением радиометрического канала ($\tau = 0,8192$ мкс, 4096 отсчетов).

По интервалам сигнала с отключенным ГШ определяются значения амплитуды спектральной компоненты. соответствующей активному сигналу в каждой из групп с разными значениями A_j : средние значения и среднеквадратическое отклонение (U_{aj} и ΔU_{aj}), где j – номер группы с фиксированным значением ослабления сигнала помехи.

Далее зарегистрированные интервалы обрабатываются по следующей схеме.

1) Вычисляется односторонний спектр мощности интервалов длительностью τ при помощи алгоритма БПФ в окне Ханна.

2) Выполняется полосовая фильтрация: отбрасываются все отсчеты спектра мощности вне полосы от 0,7 до 2,2 ГГц.

3) Выполняется сортировка отсчетов спектра мощности по уровню, пятьдесят самых мощных компонент отбрасываются.

4) Вычисляются средние значения оставшихся спектральных компонент m_{onj} и m_{offj} по отдельности для каждого A_j при включенном и отключенном ГШ.

Далее, по известным значениям T_{off} , T_{on} и полученным оценкам m_{onj} и m_{offj} рассчитываются калибровочные коэффициенты как функции амплитуды активного сигнала $k(U_{ai})$ и $b(U_{ai})$ по следующей формуле:

$$k = \frac{\left(T_{on} - T_{off}\right)}{\left(m_{on} - m_{off}\right)}, \quad b = \frac{\left(m_{off} T_{on} - m_{on} T_{off}\right)}{\left(m_{on} - m_{off}\right)}.$$
(2.2.2)

Полученные значения описываются в виде таблицы. По табличному заданию функций $k(U_{ai})$ и $b(U_{ai})$ вычисляются аппроксимирующие полиномы третьего порядка $k(U_a)$ и $b(U_a)$.

Для проверки возможности реализации радиометрического канала в активно-пассивном режиме зондирования была проведена серия лабораторных экспериментов по определению зависимости калибровочных коэффициентов радиометрического канала от амплитуды активной компоненты сигнала. Для измерений использовалась схема, приведенная на рисунке 2.2.5. Калибровка проводилась по указанной выше методике.

В результате были получены значения калибровочных коэффициентов k и b как функции амплитуды квазигармонической помехи U_a . По полученным значениям были построены аппроксимирующие полиномы третьего порядка $k(U_a)$ и $b(U_a)$. Результаты экспериментов представлены на рисунках 2.2.8 a, б.



Рисунок 2.2.8 а) – Экспериментальные значения коэффициента $k(U_{ai})$ – точки, аппроксимирующий полином $k(U_a)$ – сплошная линия.



Рисунок 2.2.8 б) – Экспериментальные значения коэффициента $b(U_{ai})$ – точки, аппроксимирующий полином $b(U_a)$ – сплошная линия.

Из рисунков 2.2.8 а, б видно, что с увеличением амплитуды сигнала активного канала разброс значений калибровочных коэффициентов растет, что связано с нелинейностью характеристик приемника по шумовому входному сигналу относительно амплитуды сигнала активного канала. Это определяет необходимость проводить активно-пассивное зондирование объектов с минимально достаточным уровнем активного канала. При этом максимальное значение амплитуды сигнала активного канала не должно превышать порога нелинейных искажений приемного устройства (в данном случае ~200 мВ), при котором существенно возрастает разброс калибровочных коэффициентов.

2.3 Обработка данных радиометрических измерений

Обработка измерительной информации, полученной в процессе зондирования исследуемого объекта, выполняется следующим образом.

На интересующем временном интервале сигнала, содержащем измерительную информацию, вычисляется амплитуда спектральной компоненты активного сигнала на ПЧ (U_{ai}) и с помощью аппроксимирующих полиномов $k(U_a)$

и $b(U_a)$ вычисляются калибровочные коэффициенты $k(U_{ai})$ и $b(U_{ai})$, где i – текущее время.

Каждый интервал сигнала длительностью τ подвергается описанной в разделе 2.2 процедуре: вычисление спектра мощности, полосовая фильтрация, сортировка и удаление дискретных спектральных компонент, вычисление средних значений оставшихся спектральных компонент m_{xi} .

Далее вычисляются значения яркостной температуры исследуемого объекта по формуле

$$T_{xi} = k(U_{ai}) m_{xi} - b(U_{ai}).$$
(2.3.1)

Для получения оценки термодинамической температуры исследуемого процесса параллельно с регистрацией шумового сигнала измеряется коэффициент отражения по амплитуде R от фронта детонации на частоте зондирующего сигнала канала передатчика. Для этого на дальней от измерительной антенны внешней границе радиопрозрачного исследуемого объекта размещается эталонная отражающая поверхность, выполненная из фольги, коэффициент отражения которой близок к единице (см. рисунок 2.4.1). Перед входом фронта детонации в исследуемый объект фиксируется амплитуда отраженного от эталонной поверхности сигнала активного канала $U_{a \max}$, после чего фольга уничтожается, процесс входит в образец, и фиксируется амплитуда отраженного от фронта детонации сигнала U_a .

На каждом интервале сигнала длительностью т вычисляется квадрат модуля коэффициента отражения от фронта исследуемого процесса по формуле:

$$\left|R_{i}\right|^{2} = \left|\frac{U_{ai}}{U_{a\max}}\right|^{2}, \qquad (2.3.2)$$

при этом значение модуля коэффициента отражения |R| = 1 соответствует амплитуде сигнала активного канала $U_{a \max}$. Термодинамическая температура исследуемого объекта на каждом интервале будет определяться по формуле:

$$T_{i} = \frac{T_{\rm xi}}{1 - \left|R_{i}\right|^{2}}.$$
(2.3.3)

Описанные алгоритмы калибровки и обработки данных были реализованы соискателем в соавторстве с коллегами из ННГУ им. Н.И. Лобачевского и НИИИС им. Ю.Е. Седакова в программном обеспечении [А8].

Для подтверждения работоспособности радиометрического канала в режиме активно-пассивного зондирования после проведения калибровки был проведен лабораторный эксперимент по схеме, представленной на рисунке 2.3.1. Измерялась яркостная температура ГШ, подключенного к антенному входу волноведущей системы через фиксированный аттенюатор (-10 дБ), введенный для изменения приведенной ко входу приемника яркостной температуры. Паспортное значение температуры ГШ на рабочей частоте прибора равно 27060 К, КСВН его входа составлял 1,3. Мощность передатчика активного канала на выходном фланце 12 мВт, составила зарегистрированная амплитуда принятого зондирующего сигнала на промежуточной частоте равна $U_{ai} = 122$ мВ. Значения калибровочных коэффициентов $k(U_{ai}) = 26447$, $b(U_{ai}) = 43273$, измеренное за интервал времени длительностью $\tau = 1$ мкс значение эквивалентной шумовой температуры на входе радиометрического канала $T_x = 2710 \pm 250$ К. При этом измеренное за такой же интервал τ значение шумовой температуры при отключенном передатчике составило $T_x = 2700 \pm 80$ К.



Рисунок 2.3.1 – Схема контрольного эксперимента

Полученный результат измерения хорошо согласуется с паспортными данными на ГШ и аттенюатор, что можно считать экспериментальным подтверждением возможности проведения синхронных активных и пассивных измерений в общем частотном диапазоне с помощью одного приемного устройства, как для активного, так и для пассивного каналов, с разделением каналов по форме спектра мощности сигнала на ПЧ. При этом флуктуационная чувствительность радиометрического канала, работающего синхронно С активным каналом, примерно в 3-5 раз хуже чувствительности такого же радиометрического приемника, не подверженного воздействию мощной узкополосной помехи со стороны генератора, входящего в состав измерительного комплекса. Ухудшение чувствительности может объясняться тем, что не были полностью удалены спектральные компоненты помехи активного канала. В следующем разделе при обработке газодинамического эксперимента ДЛЯ устранения узкополосной помехи применялась полосовая фильтрация.

2.4 Экспериментальная отработка методик

В приводятся результаты измерения яркостной данном разделе температуры детонационного фронта, распространяющегося В образце тринитротолуола (ТНТ), с помощью КВЧ радиоинтерферометра-радиометра разработки НИИИС им. Ю.Е. Седакова. Синхронно с яркостной температурой измерялось перемещение фронта детонации и коэффициент отражения от него. Газодинамический эксперимент проводился на базе ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ без участия соискателя. Обработка результатов эксперимента проводилась на кафедре радиотехники ННГУ им. Н.И. Лобачевского и в НИИИС им. Ю.Е. Седакова соискателем в соавторстве с коллегами.

Эксперимент проводился по схеме, изображенной на рисунке 2.2.2. Эскиз экспериментальной сборки представлен на рисунке 2.4.1. В качестве объекта исследования использовалась цилиндрическая шашка ТНТ диаметром 120 мм и высотой 40 мм (6), к которой подсоединена антенная система (7). Плоский детонационный фронт инициировался линзой из взрывчатого материала (4). Для устранения действия импульсной помехи от электродетонатора (1) на измерительную аппаратуру использовалась линия задержки из детонирующего прутка (2). В качестве эталонной отражающей поверхности для определения коэффициента отражения, а также для предотвращения регистрации теплового сигнала от элементов сборки, находящихся перед шашкой, между линзой и шашкой располагалась экранирующая алюминиевая фольга (5).



электродетонатор; 2 – линия задержки; 3 – промежуточный детонатор; 4 – генератор
 плоской волны (линза); 5 – алюминиевая фольга; 6 – шашка ТНТ; 7 – антенная система.
 Рисунок 2.4.1 – Эскиз экспериментальной сборки

Непосредственно перед началом измерений на экспериментальной площадке осуществляется калибровка радиометрического канала по эталонному источнику шумовой температуры. Вместо приемопередающей антенны устанавливается широкополосный генератор квазибелого (в рабочей полосе частот радиометра) шума. Регистрируется сигнал включенного генератора шума и сигнал согласованной нагрузки, находящейся при температуре окружающей по зарегистрированным сигналам рассчитываются среды, после чего калибровочные коэффициенты. Калибровка радиометрического канала при различных уровнях зондирующего сигнала осуществлялась по методике, описанной в разделе 2.2.

Осциллограмма зарегистрированного приемником информационного сигнала представлена на рисунке 2.4.2. Сигнал регистрировался цифровым

осциллографом Agilent DSO9254Ac частотой дискретизации 5 ГГц. Хорошо заметные на осциллограмме биения сигнала являются следствием интерференции колебаний, поступающих на вход приемника от передатчика через направленный ответвитель и отражённых от области контакта антенны с исследуемым образцом, и колебаний, отражённых от движущегося фронта детонации в экспериментальной сборке.



Рисунок 2.4.2 – Осциллограмма информационного сигнала ПЧ

Из рисунка 2.4.2 видно, что детонация в шашке ТНТ начинается в момент времени $t_{\mu} = 98,5$ мкс, а выход детонации на поверхность образца наблюдается в момент времени $t_{\kappa} = 104,5$ мкс.

Для расчета перемещения Δx детонационного фронта при отложенной цифровой обработке сигналов программно выполняется синхронное детектирование информационного сигнала по опорному сигналу, формируются два квадратурных сигнала (интерферограмма), по которым строится годограф. Изменение углового положения радиус-вектора годографа $\Delta \psi$ (изменение полной фазы интерферограммы между смежными отсчетами, отстоящими друг от друга по времени на величину Δt) несет информацию о перемещении объекта за это время:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\varepsilon}}\Delta\psi,\tag{2.4.1}$$

где λ – длина волны зондирующего излучения в свободном пространстве, ε – измеренная независимо диэлектрическая проницаемость среды, в которой движется отражающая поверхность.

Если интерферограмма содержит единственную спектральную компоненту ненулевой частоты на фоне аддитивного гауссова шума, то алгоритм определения перемещения исследуемого объекта по квадратурным сигналам обеспечивает получение адекватной оценки перемещения по измеренным значениям текущей фазы интерферограммы при известной длине волны зондирующего излучения в исследуемой среде [3].

На рисунке 2.4.3 представлен график зависимости перемещения детонационного фронта в шашке ТНТ от времени.



Рисунок 2.4.3 – График зависимости перемещения от времени

Линейная зависимость перемещения детонационного фронта от времени однозначно определяет постоянную скорость детонации и говорит о высокой

однородности шашки ТНТ и стационарном режиме детонации. При x = 40 мм линейная зависимость нарушается, что соответствует выходу детонации на поверхность образца. Полученный результат измерения полного перемещения фронта детонации практически точно совпадает с высотой шашки ТНТ. Скорость детонации в исследуемом образце ТНТ равна $v = (6600 \pm 100)$ м/с, что соответствует справочным данным [39]

Для получения радиометрических данных (зависимости яркостной температуры от времени) из зарегистрированного сигнала необходимо выделить слабый широкополосный сигнал теплового шума, излучаемого газодинамическим объектом, фоне узкополосного на сильного сигнала передатчика радиоинтерферометра-радиометра. На рисунке 2.4.4 представлен амплитудный спектр участка информационного сигнала, соответствующего интервалу времени от $t_{\mu} = 98,5$ мкс до $t_{\kappa} = 104,5$ мкс, вычисленный с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Наибольшими амплитудами обладают спектральные компоненты на частотах $f_{\Pi \Psi} = 1200 \text{ M}\Gamma \mu \text{ и } f_{\Pi \Psi} + f_{\Pi} = 1207 \text{ M}\Gamma \mu$. Они соответствуют сумме сигналов, поступающего через направленный ответвитель и отраженного от неподвижного переднего торца сборки, а также сигналу отраженному от движущегося детонационного фронта. По предложению коллег из НИИИС, данные компоненты спектра сигнала ПЧ дополнительно подавлялись при обработке цифровым режекторным БИХ-фильтром Баттерворта с полосой заграждения 5 МГц [А2]. Кроме этого, в спектре сигнала присутствуют несколько дискретных комбинационных компонент с амплитудами, в несколько раз средний уровень. превышающими Эти дискретные компоненты также исключаются. При обработке сигнала длительность скользящего окна составляла 0,8192 мкс (4096 отсчетов), шаг сдвига 0,1024 мкс (512 отсчетов).



Рисунок 2.4.4 – Амплитудный спектр сигнала радиометрического канала при активно-пассивном зондировании

График зависимости яркостной температуры от времени, полученный с применением избирательной фильтрации, представлен на рисунке 2.4.5 (кривая 1). Для сравнения на рисунке 2.4.5 представлен график зависимости яркостной температуры от времени, полученный при пассивных измерениях в контрольном эксперименте с отключением передатчика (кривая 2). В обоих случаях в качестве объекта исследования использовалась шашка ТНТ диаметром 120 мм и высотой 40 мм. Вертикальными линиями обозначены начало и конец газодинамического процесса в экспериментальной сборке.

Обработка сигнала в пассивном режиме производилась во временной области путем вычисления средней мощности информационного сигнала ПЧ \bar{U}_{i}^{2} в скользящем окне длительностью 0,8192 мкс с шагом 0,1024 мкс. Яркостная температура определяется как

$$T_{\rm x} = k \ \overline{U}_{i}^2 - b.$$
 (2.4.2)

Поскольку влияние зондирующего сигнала при данной постановке эксперимента отсутствует, коэффициенты *k* и *b* являются константами.



Рисунок 2.4.5 – Графики зависимостей яркостной температуры от времени: 1 – активно-пассивные измерения, 2 – пассивные измерения

В соответствии с кривой 1, до момента времени t = 98 мкс регистрируется тепловой шум исследуемого объекта, находящегося при температуре окружающей среды. Начиная с момента времени t = 98 мкс, когда скользящее окно усреднения соприкасается с участком сигнала, соответствующим началу детонации образца, наблюдается рост яркостной температуры и затем стационарный участок. При этом радиометр фиксирует яркостную температуру детонации В объеме взрывчатого вещества, флуктуирующую фронта относительно среднего значения $T_{\rm H} = (2156 \pm 354)$ К. С момента времени t = 104мкс начинается резкий рост яркостной температуры, обусловленный выходом детонации на поверхность образца ВВ и ударным разогревом прилегающего к ней воздуха. При этом происходит разрушение антенно-фидерной системы.

Сравнение кривых 1 и 2 показывает, что на интервале, соответствующем детонации в образце ТНТ, в обоих случаях наблюдаются стационарные участки. Расхождение окрестности момента $t_{\rm H} = 98,5$ MKC, кривых В времени соответствующего входу детонации в образец ТНТ, обусловлено отсутствием в случае пассивных измерений алюминиевой фольги, экранирующей тепловое излучение процессов, протекающих в линзе. Средняя яркостная температура детонационного фронта ТНТ, зарегистрированная при пассивных измерениях, составила $T_{\rm H} = (2532 \pm 397)$ К. Полученное значение с учетом погрешностей совпадает со значением средней яркостной температуры детонационного фронта в ТНТ, зарегистрированной при наличии сигнала активного канала, что позволяет возможности применения описанной методики при обработке судить о измерений, полученных при работающем передатчике КВЧ результатов радиоинтерферометра-радиометра.

Таким образом, избирательная фильтрация позволила добиться примерно одинаковой погрешности измерения яркостной температуры в активно-пассивных и чисто пассивных измерениях. При этом величина погрешности ~350 К обусловлена снижением чувствительности радиометра, приведенной к входу антенны, что вызвано потерями в длинной диэлектрической фидерной линии, разрушаемой в ходе газодинамического эксперимента.

Реализация активно-пассивного режима зондирования газодинамических процессов позволяет использовать активный канал не только для измерения перемещения фронта процесса (фазовые измерения), но и для измерения коэффициента отражения зондирующего излучения от фронта процесса (амплитудные измерения). Это дает возможность получить оценку его термодинамической температуры как функции времени или текущей координаты фронта в толще исследуемого образца.

На рисунке 2.4.6 представлена зависимость амплитуды отраженного сигнала от времени, зарегистрированная в аналогичном газодинамическом опыте. На данном графике выбраны два интервала, соответствующие сигналу,

отраженному от эталонного отражателя из фольги (1) и сигналу, отраженному от фронта детонации сразу после начала процесса (2).



Рисунок 2.4.6 – График зависимости амплитуды отраженного сигнала от времени

Рост амплитуды отраженного сигнала связан с изменением расстояния от отражающей поверхности до антенны в ходе процесса. При этом в качестве антенны использовался открытый конец ДВ, обладающий широкой ДН, что обусловило расходимость зондирующего излучения на малых расстояниях. Поскольку калибровочные коэффициенты радиометрического канала являются функциями амплитуды отражённого от объекта сигнала, в процессе быстрого перемещения они также меняются.

Первый интервал на рисунке 2.4.6 представляет собой участок сигнала с постоянной амплитудой и располагается от момента начала регистрации до входа детонации в образец и уничтожения фольги. Второй интервал расположен после входа детонации в образец, сопровождаемого резким спадом амплитуды, и выбран на относительно стабильном участке данного графика. На выбранных интервалах амплитуды отраженного сигнала усредняются, и вычисляется квадрат модуля коэффициент отражения от фронта детонации по формуле (2.3.2).

Погрешность измерения коэффициента отражения с доверительной вероятностью 0,95 рассчитывается как двойное среднеквадратичное отклонение амплитуды регистрируемого сигнала в начале процесса, нормированной на амплитуду сигнала, отраженного от фольги.

Погрешность измерений термодинамической температуры определяется погрешностью косвенных измерений яркостной температуры ΔT_x и коэффициента отражения ΔR :

$$\Delta T = \frac{T_x}{1 - R^2} \sqrt{\left(\frac{\Delta T_x}{T_x}\right)^2 + \left(\frac{2R\Delta R}{1 - R^2}\right)^2}$$
(2.4.3)

Коэффициент отражения ПО амплитуде, измеренный В данном $R = (0,52\pm0,05).$ эксперименте, составил Средняя яркостная температура детонационного фронта, измеренная в данном эксперименте, $T_{\rm H} = (2039 \pm 382)$ К. Таким образом, термодинамическая температура фронта детонации составила $T = (2794 \pm 431)$ K, согласуется со справочными данными [39] ЧТО В доверительном интервале $\pm 2\sigma$.

Выводы

Во второй главе диссертации получены следующие результаты.

Разработана и реализована в лабораторных условиях методика калибровки радиометрического в канала составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования на основе радиоинтерферометра КВЧ диапазона. Сигналы активного и пассивного измерительных каналов разделяются по форме частотного спектра при помощи описанного алгоритма фильтрации принятого сигнала. Калибровочные коэффициенты радиометрического канала являются функциями амплитуды отражённого от объекта и принятого приёмником сигнала передатчика, в связи с чем необходимо проводить калибровку радиометрического канала при различных уровнях зондирующего сигнала. Зависимости калибровочных коэффициентов радиометрического канала от амплитуды сигнала активного канала экспериментально получены и объясняются нелинейным воздействием смеси входного шумового процесса с узкополосным сигналом на приемное устройство. Разброс калибровочных коэффициентов растет по мере увеличения амплитуды активного сигнала. При этом радиометрический канал остается приемлемым для измерения мощности шумов внешних источников при амплитуде квазигармонической помехи примерно вдвое меньшей уровня, соответствующего появлению нелинейных искажений в сигнале активного канала.

Экспериментально подтверждена возможность одновременного измерения параметров движения и тепловых характеристик быстропротекающих процессов с помощью такого комплекса.

Достигнутая погрешность измерения яркостной температуры фронта детонации конденсированного взрывчатого вещества определяется характеристиками приёмного устройства, включая потери в фидерной системе, и составила (350 – 400) К при минимально допустимой длине (2,5 м) уничтожаемого в процессе газодинамического эксперимента волноведущего тракта на основе ДВ, временном разрешении порядка 1 мкс и полном сохранении метрологических характеристик интерферометрического канала как средства измерения перемещений.

Разработан и реализован в виде программного обеспечения алгоритм определения термодинамической температуры объекта на основе измерительных данных комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования.

Основные результаты, полученные во 2 главе диссертации, опубликованы в сборниках трудов конференций [A10-A13, A15-A17], статьях [A1-A3]. Соискатель является соавтором патента [A7] и программного обеспечения [A8].

Глава 3. Восстановление профиля температуры фронта быстропротекающего процесса по измерительным данным многоканального радиометра

3.1 Многоканальное микроволновое зондирование быстропротекающих процессов

Наряду с регистрацией одномерных динамических параметров газодинамических объектов, которая выполняется при помощи одноканального радиоинтерферометра, актуальна задача исследования динамики изменения формы объекта и распределения температуры по его поверхности при газодинамических процессах.

Задача восстановления формы движущегося объекта решается путем определения некоторого ограниченного числа параметров, которые описывают форму объекта с достаточной точностью. В работах [7, 36] показано, что по результатам измерения скоростей движения десяти локальных областей поверхности возможно реконструировать поле перемещений движущейся произвольной поверхности второго порядка. В этих статьях также определены требования к многоканальному радиоинтерферометру.

Многоканальный радиоинтерферометр состоит ИЗ 9 измерительных модулей, каждый из которых имеет один приемопередающий и два приемных канала. При этом приемопередающие каналы разнесены по частоте, а приемники и передатчики имеют раздельные микроволновые выходы. В ходе эксперимента зондированию пластины, метаемой ПО полета продуктами взрыва, регистрировались 27 интерферограмм, которые соответствуют всем комбинациям По приемных передающих каналов. полученным интерферограммам И восстанавливалась динамика перемещения поверхности исследуемого объекта. сплайн-Синтез профилей пластины проводился методом двумерной аппроксимации на неравномерной сетке узлов. [117, 118]

При измерении яркостной температуры объекта, вся поверхность которого имеет одинаковую температуру, используется одноканальный радиометр, причём оценка с точностью порядка 100 К может быть получена за время порядка 1 мкс,

что позволяет измерять температуру быстропротекающих высокоэнергетических процессов. Реализация такого радиометра обсуждалась в предыдущей главе диссертации.

Очевидно, что для измерения закона распределения температуры по поверхности также требуется несколько каналов. Хорошо известны многоканальные методы измерения яркостной температуры распределённых источников с малыми угловыми размерами и получения их двумерных радиоизображений в случае, когда ДН каждого элемента антенной решётки радиометрического комплекса охватывает объект исследования полностью (интерферометрия), либо когда антенна может двигаться (апертурный синтез) [40, 97, 114-116]. Существенной здесь является возможность одновременного охвата каждой части объекта исследования несколькими антеннами.

Другой подход к восстановлению распределения температуры по поверхности может состоять в измерении температуры в нескольких точках и последующей интерполяции. Под измерением в точке подразумевается измерение в малом пятне, температуру в котором можно считать постоянной. Для проведения таких измерений следует фокусировать излучение (радиовидение) [116].

Отдельную задачу представляет случай, когда поверхность с неизвестным распределением температуры перемещается, причём в процессе перемещения распределение температуры может меняться. Такая задача может возникать, например, при исследовании распространения фронта детонации в образце взрывчатого вещества. Применение упомянутых выше подходов к получению радиоизображений быстроперемещающихся поверхностей обладает рядом ограничений.

Перемещение фронта детонационной волны за время эксперимента может составлять более 10 см (несколько десятков длин волн), при этом, с одной стороны, объект должен оставаться в зоне покрытия ДН антенн, с другой стороны, ДН не должны быть шире объекта исследования, чтобы не захватывать излучение от других объектов. При этом антенная система радиометра должна быть расположена вблизи от объекта по энергетическим соображениям. Сочетание этих двух условий требует размещения движущегося объекта в ближней зоне антенн, однако при этом фазовые характеристики антенн становятся зависимыми от расстояния между антеннами и объектом.

Таким образом, реализовать стабильные на всём перемещении объекта исследования фазовые характеристики антенной решетки радиометра, как минимум, затруднительно. Поэтому применение классических методов получения радиоизображений интерферометрическими методами не представляется возможным.

Апертурный синтез затрудняется тем, что высокая скорость перемещения исследуемого объекта (несколько км/с) и ограниченная скорость регистрирующей аппаратуры делают сканирование практически невозможным. Поскольку зондирующее излучение микроволнового диапазона затруднительно сфокусировать в маленькое пятно во всем интервале быстрого перемещения исследуемого объекта на малой дальности от антенны, подход с интерполяцией результатов радиометрических измерений в нескольких точках (радиовидение) имеет ряд трудностей. Яркостная температура будет усредняться в большом пятне с переменным радиусом, что существенно снизит точность. Для сохранения точности необходимо учитывать эффект изменения углового размера области измерения при последующей интерполяции.

В настоящей главе предлагается метод многоканальной радиометрии, позволяющий оценивать закон распределения температуры по поверхности при произвольном перекрытии ДН измерительных антенн и их произвольной ширине, не выходящей за пределы объекта исследования. Предлагаемый метод обходит принципиальные ограничения классических методов при работе с быстроперемещающимися поверхностями.

63

3.2 Математическое описание задачи

Пусть поверхность с неизвестным распределением температуры движется в направлении антенной системы многоканального радиометра. Форма поверхности и её расположение относительно радиометра должны быть известны в каждый момент времени, например, измерены с помощью многоканального радиоинтерферометра [7]. Вопросу выбора облика антенно-фидерной системы многоканального радиоинтерферометра посвящена работа [37].

На рисунке 3.2.1 условно показано взаимное расположение антенн радиометра в виде конических рупоров и поверхности, а заштрихованными кругами показаны области, стягиваемые ДН антенн. ДН могут, в частности, перекрываться, что принципиально не влияет на работоспособность метода.



Рисунок 3.2.1 – Взаимное расположение антенн радиометра и объекта исследования

Пусть $\varphi(x,y)$ – функция, описывающая истинное распределение термодинамической температуры по поверхности в некоторой выбранной системе координат. Будем считать, что каждый канал радиометра предварительно откалиброван, а коэффициент поглощения исследуемого объекта на частоте измерений известен. Методы калибровки радиометра и оценки коэффициента

поглощения обсуждались во 2 главе настоящей диссертации. Далее в настоящей главе мы будем говорить о распределении яркостной температуры.

Поскольку яркость излучения может зависеть от угла между нормалью к поверхности и направлением визирования, обозначим эту зависимость $L(\gamma)$, где, γ – угол между нормалью к поверхности в текущей точке (x, y) и направлением на фазовый центр антенны. В частности, она может описываться законом Ламберта, то есть быть константой [97]. Также при расчётах понадобится информация о ДН антенн радиометра по мощности. Обозначим их $\Psi^*_i(\alpha,\beta)$, где α и β – угловые координаты в некоторой привязанной к антенне системе координат, *i* – номер антенны.

Тогда яркостная температура *f_i*, измеренная *i*-й антенной, может быть выражена через интеграл

$$f_i = K_i \iint_{S_i} \varphi(x, y) L(\gamma) \Psi_i^*(\alpha, \beta) J(x, y, \gamma, \vec{\rho}_i) dx dy, \qquad (3.2.1)$$

где интегрирование ведётся по пятну поверхности S_i , охваченному ДН, α и β – угловые координаты точки (x, y) в системе координат, связанной с антенной, $J(x, y, \gamma, \vec{\rho}_i)$ – угловой размер, который имеет элементарная площадка интегрирования при наблюдении из фазового центра антенны (якобиан), $\vec{\rho}_i$ – радиус-вектор, проведённый из фазового центра антенны к точке (x, y). K_i - калибровочный множитель. Введённые обозначения проиллюстрированы на рисунке 3.2.2.



Рисунок 3.2.2 – Иллюстрация обозначений (1 - фазовый центр антенны; 2 – исследуемый объект)

Можно заметить, что при заданных взаимных положениях поверхности и антенны радиометра множитель $K_i L(\gamma) \Psi_i^*(\alpha, \beta) J(x, y, \gamma, \vec{\rho}_i)$ в интеграле (3.2.1) зависит только от x и y. Упрощая запись, обозначим его $\Psi_i(x, y)$. Тогда интеграл (3.2.1) можно переписать в виде

$$f_i = \iint_{S_i} \varphi(x, y) \Psi_i(x, y) dx dy$$
(3.2.2)

Далее описан метод приближённого восстановления $\phi(x,y)$ по конечному набору значений f_i , при условии, что функции $\Psi_i(x,y)$ известны.

3.3 Случай бесконечно узких диаграмм направленности

В случае, когда все ДН антенн радиометра настолько узки, что охватывают области исследуемого объекта S_i , в каждой из которых яркостная температура $\varphi(x,y)$ постоянна, из-под знака интеграла (3.2.2) можно вынести множитель $\varphi(x_i,y_i)$, где (x_i,y_i) – произвольная точка области S_i . Оставшийся интеграла будет равен константе, и, выбрав калибровочный множитель соответствующим образом,

можно записать $f_i = \varphi(x_i, y_i)$, то есть можно считать, что в результате измерения становятся известны значения яркостной температуры в известных точках поверхности. Этих точек столько же, сколько антенн радиометра, и их расположение можно выбирать, направляя антенны нужным образом до эксперимента.

Если дискретного набора значений f_i не достаточно, то для восстановления приближённого распределения яркостной температуры по поверхности можно использовать процедуру двумерной сплайн-интерполяции или сплайн-аппроксимации [117, 118]. Изложим кратко суть этих процедур.

Пусть $f_i = \varphi(x_i, y_i)$, где $\varphi - \varphi$ ункция, известная в N точках с координатами (x_i, y_i) , а $i \in [1, N]$. Тогда непрерывная функция $\varphi^*(x, y)$, задаваемая выражением

$$\varphi^{*}(x, y) = \sum_{i=1}^{N} C_{i} r_{i}^{2} \ln r_{i}^{2} + C_{N+1} + C_{N+2} x + C_{N+3} y$$

$$r_{i}^{2} = (x - x_{i})^{2} + (y - y_{i})^{2}$$
(3.3.1)

будет являться сплайн-*интерполяцией* точек *f_i*, если коэффициенты *C_i* удовлетворяют системе уравнений

$$\begin{pmatrix} 0 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1N} & 1 & x_1 & y_1 \\ \rho_{21} & 0 & \cdots & \rho_{2N} & 1 & x_2 & y_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \cdots & 0 & 1 & x_N & y_N \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_N & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N & 0 & 0 & 0 \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdots \\ C_N \\ C_N \\ C_{N+1} \\ C_{N+2} \\ C_{N+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
(3.3.2)

где

$$\rho_{ij} = r_{ij}^2 \ln r_{ij}^2$$

$$r_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$$

Если в системе уравнений (3.3.2) первые N элементов главной диагонали заменить на числа $\lambda > 0$, то функция, задаваемая уравнением (3.3.1), превратится в

сплайн-*аппроксимацию* исходных точек f_i . Чем больше λ , тем более «жёстким» будет решение, и при возрастании λ поверхность $\phi^*(x,y)$ стремится к плоскости, проходящей на минимальном среднеквадратичном расстоянии от точек f_i .

При отсутствии дополнительных априорных данных о $\varphi(x,y)$ использование интерполяции экспериментальных данных сплайн-поверхностью, имеющей минимальную кривизну, является разумным. Сплайн-аппроксимацию следует использовать, когда значения f_i содержат шум. Параметр λ следует подобрать таким, чтобы среднеквадратичное отклонение (СКО) экспериментальных данных f_i от аппроксимирующей функции $\varphi^*(x_i, y_i)$ было равно СКО шума.

Для определенности отметим, что процедура сплайн-интерполяции, применимая к функциям любой природы, далее используется для описания распределения яркостной температуры по поверхности известной формы, а не для описания самой формы поверхности.

3.4 Случай произвольных диаграмм направленности

В случае, когда яркостная температура внутри области S_i не одинакова, нельзя говорить о том, что в результате измерений известны значения яркостной температуры в каких-то конкретных точках поверхности. Однако, как будет показано ниже, описать результат измерения сплайн-поверхностью всё же возможно. Вновь рассмотрим функцию вида (3.3.1). За точку (x_i,y_i) выберем какую-нибудь определённую точку области S_i , например, точку пересечения поверхности с осью симметрии ДН. Предположим, что функция $\varphi^*(x,y)$ может точно описать реальное распределение яркостной температуры $\varphi(x,y)$ при некоторых значениях параметров C_i . Подставим в (3.2.2) $\varphi^*(x,y)$ вместо $\varphi(x,y)$.

$$f_i^* = \iint_{S_i} \varphi^*(x, y) \Psi_i(x, y) dx dy, \qquad (3.4.1)$$

где f_i^* – результат измерения.

Далее подставим в (3.4.1) выражение для $\phi^*(x,y)$ из (3.3.1):

$$f_{i}^{*} = \iint_{S_{i}} \left(\sum_{j=1}^{N} C_{j} r_{j}^{2} \ln r_{j}^{2} + C_{N+1} + C_{N+2} x + C_{N+3} y \right) \Psi_{i}(x, y) dx dy = \sum_{j=1}^{N} \left[C_{j} \iint_{S_{i}} \Psi_{i}(x, y) r_{j}^{2} \ln r_{j}^{2} dx dy \right] + C_{N+1} \iint_{S_{i}} \Psi_{i}(x, y) dx dy + C_{N+2} \iint_{S_{i}} x \Psi_{i}(x, y) dx dy + C_{N+3} \iint_{S_{i}} y \Psi_{i}(x, y) dx dy$$

то есть получаем *N* уравнений для коэффициентов *C_i*. Оставшиеся три уравнения — это последние три уравнения системы (3.3.2) для коэффициентов сплайн-поверхности. Введём обозначения:

$$\rho_{ij} = \iint_{S_i} \Psi_i(x, y) r_j^2 \ln r_j^2 dx dy,$$

$$a_i = \iint_{S_i} \Psi_i(x, y) dx dy,$$

$$b_i = \iint_{S_i} x \Psi_i(x, y) dx dy,$$

$$d_i = \iint_{S_i} y \Psi_i(x, y) dx dy.$$

Тогда система уравнений для C_i приобретёт следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1N} & a_1 & b_1 & d_1 \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2N} & a_2 & b_2 & d_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \cdots & \rho_{NN} & a_N & b_N & d_N \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_N & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_N & 0 & 0 & 0 \\ \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdots \\ C_N \\ C_N \\ C_{N+1} \\ C_{N+2} \\ C_{N+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1^* \\ f_2^* \\ \cdots \\ f_N^* \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \end{pmatrix}.$$
(3.4.2)

3.5 Оценка величины ошибки аппроксимации

Система уравнений (3.4.2) позволяет найти коэффициенты сплайнповерхности по измеренным значениям яркостной температуры (3.4.1) в том случае, когда истинное распределение яркостной температуры может быть точно описано с помощью сплайн-поверхности. То есть, в этом случае возможно восстановить распределение яркостной температуры несмотря на то, что при измерении происходит усреднение в некоторой, возможно, довольно широкой, области.

С другой стороны, не любое распределение яркостной температуры в точности описывается сплайн-поверхностью вида (3.3.1). Требуется оценить величину ошибки, которая может возникнуть, если при восстановлении распределения яркостной температуры мы всё же будем считать его описанным сплайн-поверхностью. Для этого рассмотрим три случая, когда истинное распределение яркостной температуры $\varphi(x,y)$ описывается частью наклонной плоскости, частью эллиптического параболоида и частью гиперболического параболоида (рисунок 3.5.1). Эти три модельные поверхностей с различным распределением кривизны. Разброс яркостной температуры (рисунок 3.5.1) от 300 К до 360 К выбран условно, оценка величины ошибки будет на него нормирована. Заметим, что наклонная плоскость может быть точно описана сплайн-поверхностью, поэтому ошибка должна получиться равной нулю. Величину ошибки определим с помощью численного моделирования.



Рисунок 3.5.1 – Модельные распределения яркостной температуры

Будем считать, что исследуемый объект представляет собой часть плоскости размером 1×1 условных единиц длины. Введём на нём прямоугольную систему координат ХҮ: $x \in [0,1]$, $y \in [0,1]$. Пусть радиометр имеет девять каналов, оси симметрии ДН перпендикулярны плоскости и пересекаются с ней в точках с координатами (x_i, y_i): (0.25, 0.25), (0.25, 0.5), (0.25, 0.75), (0.5, 0.25), (0.5, 0.5), (0.5, 0.75), (0.75, 0.25), (0.75, 0.5), (0.75, 0.75). Объект исследования и антенны схематично представлены на рисунке 3.5.2. Для определённости, все функции $\Psi_i(x,y)$ будем считать константами 1/(πR^2) в круге с центром (x_i, y_i) и радиусом *R*. Найдём величину ошибки для *R* равных 0.0001, 0.1 и 0.25. В первом случае радиус меньше шага численного интегрирования, который был равен 0.001, что позволяет промоделировать случай бесконечно узких ДН. Во втором случае ДН от разных антенн не пересекаются, хотя и довольно широки, а в третьем – настолько широки, что пересекаются.



Рисунок 3.5.2 – Взаимное расположение объекта исследования и антенн

Моделирование будет заключаться в вычислении девяти «измеренных» значений яркостной температуры на каждом из заданных распределений $\varphi(x,y)$ по формуле (3.2.2). Далее, из системы (3.4.2) найдём коэффициенты сплайнповерхности $\varphi^*(x,y)$. Ошибкой будем считать нормированное усредненное по площади среднеквадратичное отклонение истинного распределения от найденной сплайн поверхности:

$$E = \frac{\sqrt{\frac{1}{S}} \iint_{S} [\varphi(x, y) - \varphi^{*}(x, y)]^{2} dx dy}{\max \varphi(x, y) - \min \varphi(x, y)}.$$
(3.5.1)

Нормировка на разброс яркостной температуры, во-первых, позволяет получить относительную погрешность, а, во-вторых, делает оценку ошибки информативной с точки зрения качества измерения переменной составляющей яркостной температуры, а не просто среднего значения, для измерения которого было бы достаточно одной антенны. В итоге, сравним полученную ошибку при различных распределениях $\phi(x,y)$ и различной ширине ДН *R*.

В таблице 3.5.1 приведены результаты численного моделирования. Представлены значения ошибки *E* для трёх типов поверхности и трёх значений радиуса стягиваемой ДН области поверхности *R*.
Графики исходных (красный) и восстановленных (9 измерительных каналов, с учётом ДН – синий) распределений температуры при R = 0.25 приведены на рисунке 3.5.3. Точками на графиках показаны расположение антенн радиометра.





Рисунок 3.5.3 – Исходные (красный) и восстановленные (синий) распределения температуры: плоскость (а), эллиптический параболоид (б), гиперболический параболоид (в)

Таблица 3.5.1. Ошибки восстановления распределения яркостной температуры с учётом ДН, 9 каналов

	R = 0.0001	R = 0.1	R = 0.25
Плоскость	0	0	0
Эллипт. параболоид	0.26	0.22	0.12
Гиперб. параболоид	0.25	0.22	0.14

Можно отметить, что, во-первых, наклонная плоскость описывается сплайнповерхностью точно (рисунок 3.5.3 а), вне зависимости от величины радиуса *R*. Во-вторых, даже при бесконечно узких ДН ошибки интерполяции сплайном как эллиптического, так и гиперболического параболоидов весьма значительны, что соответствует совпадению модельных и интерполирующих поверхностей только в узлах интерполяции. В-третьих, средняя ошибка восстановления значения яркостной температуры в каждой точке много меньше разброса яркостной температуры по всей поверхности, и, в-четвёртых, она убывает с увеличением ширины ДН.

Для сравнения рассмотрим случай, когда измеренные значения яркостной температуры подставляются в систему уравнений (3.3.2) для определения коэффициентов сплайн-поверхности без учёта ДН. То есть при нахождении коэффициентов сплайн-поверхности ДН теперь считаются бесконечно узкими, не являясь такими на самом деле. Получившиеся ошибки представлены в таблице 3.5.2. Из таблиц 3.5.1 и 3.5.2 видно, что, за исключением случая наклонной плоскости, ошибка аппроксимации без учёта ДН выше, чем с их учётом.

Таблица 3.5.2. Ошибки восстановления распределения яркостной температуры без учёта ДН, 9 каналов

	R = 0.0001	R = 0.1	R = 0.25
Плоскость	0	0	0
Эллипт. параболоид	0.26	0.25	0.22
Гиперб. параболоид	0.25	0.25	0.25

Полученный результат – повышение точности сплайн-интерполяции поверхностей с двумерной кривизной при замене узлов интерполяции областями интегрирования с конечными размерами и известным весовым распределением – объясняется тем, что увеличивая радиус усреднения в окрестности узла интерполяции, мы увеличиваем погрешность в узловых точках, но уменьшаем среднюю погрешность, делая сплайн более «правильным» в среднем, фактически переходя к сплайн-аппроксимации в указанном выше смысле.

Рассмотрим теперь, как меняется ошибка при увеличении числа измерительных каналов. Количество антенн увеличим до 16 и расположим их в узлах квадратной сетки в точках (0.2, 0.2), (0.2, 0.4), (0.2, 0.6), (0.2, 0.8), (0.4, 0.2), (0.4, 0.4), (0.4, 0.6), (0.4, 0.8), (0.6, 0.2), (0.6, 0.4), (0.6, 0.6), (0.6, 0.8), (0.8, 0.2), (0.8, 0.4), (0.8, 0.6), (0.8, 0.8). Как и ранее, положим R равным 0.0001, 0.1 и 0.25.

Коэффициенты сплайн-поверхности рассчитываются по системе уравнений (3.4.2). Результаты представлены в таблице 3.5.3.

Таблица 3.5.3. Ошибки восстановления распределения яркостной температуры без учёта ДН (16 каналов)

	<i>R</i> =0.0001	<i>R</i> =0.1	<i>R</i> =0.25
Плоскость	0	0	0
Эллипт. параболоид	0.16	0.13	0.08
Гиперб. параболоид	0.17	0.15	0.11

Сравнив таблицы 3.5.1 и 3.5.3, отметим, что увеличение числа измерительных каналов привело к значительному уменьшению ошибки, что объясняется наличием большей апостериорной информации при определении формы сплайн-поверхности. При этом величина ошибки восстановления в случае 9 каналов с учетом ДН (R = 0.25) становится сопоставимой со случаем 16 каналов без учета ДН (R=0.1).

В работе [37] обсуждается применение в многоканальной радиоинтерферометрии излучателей, формирующих гауссову осесимметричную ДН. Рассмотрим работоспособность метода в случае, если функция, описывающая ДН имеет вид двумерного гауссовского распределения в круге с центром (x_i, y_i) и радиусом *R*, равным 2 σ :

$$\Psi i(x,y) = \frac{1}{\pi R^2/2} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{R^2/2}\right).$$
(3.5.2)

В таблице 3.5.4 приведены результаты моделирования для 9 измерительных каналов, R выберем равным 0.1 и 0.25.

Таблица 3.5.4. Ошибки восстановления распределения яркостной температуры с учётом ДН (гауссовское распределение), 9 каналов.

	R = 0.1	R = 0.25
Плоскость	0	0
Эллипт. параболоид	0.24	0.15
Гиперб. параболоид	0.24	0.18

Из сравнения таблиц 3.5.1 и 3.5.4, видно, что ошибки восстановления возрастают по сравнению со случаем равномерного распределения, однако убывают с увеличением ширины ДН. Таким образом, предложенный метод сохраняет свою работоспособность в случае гауссовской функции $\Psi_i(x,y)$.

Выводы

В третьей главе диссертации предложен метод, позволяющий повысить точность восстановления распределения температуры по поверхности исследуемого объекта по результатам измерений многоканального радиометра. Этот метод представляет собой модифицированную сплайн-аппроксимацию результатов измерений яркостной температуры объекта в узловых точках с учётом влияния ДН антенн.

Проанализировав результаты численного моделирования, можно заключить, что предложенный метод действительно позволяет описывать двумерные распределения яркостной температуры, измеряемые с помощью многоканальных сплайн-поверхностей радиометров, посредством с высокой точностью, обычной существенно превосходящей точность сплайн-интерполяции, проводимой без учёта влияния ДН антенн. В рассмотренных примерах было достигнуто увеличение точности восстановления распределения, эквивалентное увеличению числа измерительных каналов системы с 9 до 16. Положительный увеличении ДH эффект усиливается при степени перекрытия антенн многоканального радиометра. Показана работоспособность метода в случае гауссовской осесимметричной ДН.

Основные результаты, полученные в третьей главе диссертации, опубликованы в статье [A5].

77

Глава 4. Многоканальная радиоинтерферометрическая система для измерения динамических параметров конструкций

4.1 Задача контроля динамических параметров элементов конструкций

Невысокая чувствительность радиоинтерферометрии метода В миллиметровом И сантиметровом диапазоне длин волн К параметрам естественной шероховатости отражающих поверхностей, которые как правило диапазоне ~ 1...100 мкм, лежат В делает его важным инструментом невозмущающей диагностики динамических параметров конструкций.

Например, в РФЯЦ-ВНИИЭФ для диагностики реакции элементов силового герметизирующего корпуса взрывозащитных камер при взрыве внутри них заряда ВВ применяется радиоинтерферометр миллиметрового диапазона длин волн. [8]

Наряду с задачей исследования динамической реакции конструкций на взрывное нагружение, актуальна проблема контроля колебаний зданий и сооружений, вызываемых действием ветровых, сейсмических, технологических нагрузок. Контроль необходим для оценки остаточного ресурса зданий и сооружений и своевременного предупреждения об опасности разрушения конструкции при скачкообразном изменении параметров колебаний сооружения по сравнению с данными долговременных непрерывных наблюдений.

Кроме систем контроля текущего состояния конструкций, в сейсмически опасных районах применяются системы гашения колебаний. Основной принцип динамического гашения состоит в присоединении с помощью упругих элементов к объекту защиты дополнительного тела и перераспределении энергии колебаний таким образом, чтобы колебательная активность основного объекта была как можно меньше. Широко распространены пассивные способы гашения колебаний, но они обладают рядом недостатков: устройства имеют узкий диапазон рабочих частот и рассчитаны на определенный тип внешнего воздействия. Поэтому в настоящее время ведутся разработки систем активного управления колебаниями и систем комбинированного типа (см. обзор [119]). В таких системах для силового воздействия на здание применяют приводы с дополнительными источниками энергии. Управляющее воздействие формируется на основе измерений откликов здания.

Важную роль при разработке активных систем играет выбор типа датчика для измерения смещений, частот и форм колебаний конструкции. Наиболее распространены системы, в которых механические колебания преобразуются в электрические с последующей их регистрацией. Датчики могут быть механически связаны с вибрирующей поверхностью либо не иметь с ней непосредственного контакта.

При контактном методе контроля в качестве датчиков, как правило, используются акселерометры. Однако их недостатками являются непригодность для прямого измерения взаимных перемещений элементов конструкции и ограниченный частотный диапазон измеряемых смещений. Альтернативой им являются бесконтактные датчики перемещений. Обзор современного состояния уровня техники в области бесконтактных датчиков для систем контроля технического состояния зданий приведён в статье [9]. В качестве таких датчиков используются приемные устройства глобальных навигационных систем (GPS, ГЛОНАСС) или работающие по тому же принципу локальные навигационные системы, лазерные, радиолокационные И телевизионные измерители перемещений.

Навигационные системы не обеспечивают требуемой субмиллиметровой точности измерения взаимных перемещений элементов конструкции. Телевизионные системы хороши для измерения тангенциальных взаимных перемещений, но непригодны для измерения перемещений вдоль линии визирования.

Этих недостатков лишены бесконтактные датчики, работающие по принципу интерферометров оптического ИЛИ микроволнового излучения. Лазерные системы обеспечивают наибольшую точность измерения, однако имеют ограничений: серьезных сложность инсталляции И эксплуатации, ряд измерения повышенной задымлённости, невозможность В условиях

запылённости, в присутствии гидрометеоров (атмосферных осадков), при сильной вибрации, значительных изменениях температуры и влажности.

Микроволновые фазометрические системы используют зондирующее излучение с длиной волны на 3-4 порядка больше, чем у лазерных систем. Поэтому по сравнению с ними они более устойчивы к воздействию перечисленных мешающих факторов и обеспечивают приемлемую в целом ряде приложений точность измерения. Принцип действия большинства существующих микроволновых датчиков состоит в сравнении фаз излучаемых и принимаемых самим устройством электромагнитных колебаний, отражающихся от поверхности перемещаемого объекта. Изменение расстояния от устройства до объекта приводит к пропорциональному изменению фазы отражённого сигнала.

В большинстве случаев размещение датчиков на независимом от масштабного объекта основании нецелесообразно или невозможно, поэтому они должны находиться внутри конструкции. Принцип работы датчика, основанный на сравнении фаз электромагнитных колебаний, излучаемых навстречу друг другу, позволит увеличить энергетический потенциал, а, следовательно, и дальность действия измерительной системы. Таким образом, датчик должен иметь в составе два приемопередающих блока (ППБ), каждый из которых жестко закреплен в узлах конструкции и, следовательно, имеет с ней кинематическую связь.

изменений Важными параметрами анализе напряженнопри деформированного состояния здания в процессе эксплуатации являются период и логарифмический декремент основного тона собственных колебаний здания. Для определения значений периода применяют косвенный метод измерений, при колебаний котором регистрируют процессы здания ПО трем взаимно перпендикулярным осям. Значения периода по каждой из осей определяют по результатам измерений по соответствующей оси расчетным методом, основанным на анализе спектров мощности колебаний здания. Значения декремента по каждой из взаимно перпендикулярных осей определяют также расчетным методом по результатам измерений, проведенных для определения значений периода.

Для контроля упругих деформаций в виде горизонтального сдвига элементов конструкции здания, силовой каркас которого состоит из жестко соединенных под прямым углом балок, необходимо контролировать взаимное смещение между узлами, противолежащими на диагоналях ортогональных плоскостей решетки каркаса, как показано на рисунке 4.1.1.



Рисунок 4.1.1 – Схема линий визирования на каркасе секции здания

Из представленной схемы видно, что три линии визирования являются диагоналями прямоугольников, образованных силовыми балками элементов каркаса. Таким образом, любой горизонтальный сдвиг силовой конструкции приведет к деформации этих прямоугольников в параллелограммы, что проявится в изменении длины диагоналей четырехугольников. Контроль длины двух таких диагоналей, расположенных в двух ортогональных вертикальных плоскостях, обеспечит однозначное получение оценки вектора горизонтального сдвига верхней плоскости секции здания относительно нижней, а дополнительный контроль длины диагонали в верхней горизонтальной плоскости позволяет оценить и угол скручивания конструкции вокруг вертикальной оси симметрии.

Сложная структура конструкции, каркас которой может состоять из множества секций, требует использования нескольких измерительных каналов. Понятно, что для реализации описанной схемы измерений динамических параметров конструкций требуется создание МРИС малой дальности действия на основе набора независимых микроволновых датчиков с двумя ППБ, находящимися в кинематической связи с узлами конструкции. При создании

такой системы требуется решить проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) между датчиками, а также обеспечить синхронный сбор измерительных данных.

4.2 Многоканальная система на основе набора двухпозиционных СВЧ интерферометров.

Основой МРИС для измерения динамических параметров конструкций является набор двухпозиционных СВЧ интерферометров. Интерферометр [38, A14] состоит из двух одинаковых и независимых приемопередающих блоков, жестко закрепленных на элементах конструкции, между которыми проводится измерение взаимного смещения.

Структурная схема двухпозиционного СВЧ интерферометра представлена на рисунке 4.2.1. В состав каждого приемопередающего блока (ППБ1, ППБ2) входят: генератор гармонических колебаний (Г1, Г2 – генерируют колебания на частоте ω_1 , и ω_2 соответственно), высокочастотный усилитель (У1, У2). Делитель мощности (ДМ1, ДМ2) передает часть мощности сигнала генератора на квадратурный демодулятор (КД1, КД2) в качестве опорного колебания. Передающие антенны каждого блока (А1, А3) излучают в направлении приемных антенн другого блока (А2, А4). При этом поляризации передающих антенн А1 и А3 ортогональны и согласованы с поляризациями приемных антенн А2 и А4 соответственно. Сигнал с приемной антенны поступает на квадратурный демодулятор.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП1, АЦП2) синхронизируются от общего опорного генератора (ОГ). Оцифрованные сигналы ПЧ передаются на цифровой блок (ЦБ), данные из которого поступают через сетевой концентратор (СК) на центральную ЭВМ МРИС.



Рисунок 4.2.1 – Структурная схема двухпозиционного СВЧ интерферометра

Так как антенны A2 и A3 направлены друг на друга, на вход КД1 поступает сигнал на частоте ω_2 (длина волны λ_2), излученный антенной A3, с временной задержкой (*x/c*), где *x* – контролируемое расстояние между элементами конструкции, а *c* – скорость света, и фазовым сдвигом ($2\pi x/\lambda_2$).

Точно также, на вход КД2 поступает сигнал на частоте ω_1 (длина волны λ_1), излученный антенной А1, с такой же временной задержкой и фазовым сдвигом $2\pi x/\lambda_1$.

На выходе КД1 формируются квадратурные сигналы I_1 и Q_1 на частоте $f_{\Pi \Psi} = |\omega_1 - \omega_2|/2\pi \sim 25$ КГц, текущая фаза которых описывается соотношением:

$$\Phi_1(t) = \left[\omega_1 t + \varphi_1(t) - \omega_2 t + 2\pi x/\lambda_2 - \varphi_2(t - x/c)\right]$$
(4.2.1)

На выходе КД2 формируются сигналы I_2 и Q_2 , текущая фаза которых описывается соотношением:

$$\Phi_{2}(t) = \left[\omega_{1}t - 2\pi x/\lambda_{1} + \varphi_{1}(t - x/c) - \omega_{2}t - \varphi_{2}(t)\right].$$
(4.2.2)

Здесь *t* – текущее время, $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ – медленно меняющиеся случайные начальные фазы (низкочастотные фазовые шумы) колебаний, вырабатываемых генераторами Г1 и Г2 соответственно.

Сигналы с выходов КД1 и КД2 передаются на входы АЦП1 и АЦП2 соответственно. Оцифрованные с одинаковым интервалом дискретизации сигналы поступают на вход цифрового блока, где происходит цифровое фазовое детектирование, т.е. вычисление разности фаз этих двух сигналов

$$\{\Phi_1(t) - \Phi_2(t)\}.$$
 (4.2.3)

С учетом того, что $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ – это медленные функции времени и их изменением за малое, порядка одной микросекунды, время задержки (*x/c*) можно пренебречь, выходной сигнал цифрового «фазового детектора» пропорционален $4\pi x/\lambda$, где λ - среднее значение двух длин волн λ_1 и λ_2 . Этот сигнал умножается на коэффициент ($\lambda/4\pi$). Полученный таким образом выходной сигнал является дискретным представлением зависимости смещения (Δx) от времени и может быть использован для выработки сигналов управления активной системы контроля колебаний.

Оценим потенциальную точность фазового метода измерения перемещения.

Потенциальная погрешность определения перемещения в 95% доверительном интервале оценивается по формуле:

$$\Delta x = 2\sigma_{\rm x} = 2\sqrt{\frac{\lambda^2}{16\pi^2}\sigma_{\varphi}^2 + \frac{\sigma_{\lambda}^2}{\lambda^2}x^2}, \qquad (4.2.4)$$

 $\frac{\sigma_{\lambda}}{\lambda}$ – относительная погрешность определения длины волны – техническая характеристика интерферометра и определяется нестабильностью частоты генератора зондирующего излучения в составе интерферометра.

 σ_{φ} – погрешность определения фазы сигнала.

Для оценки вклада погрешности определения длины волны в погрешность определения перемещения рассмотрим случай, когда объект перемещается со скоростью 10 мм/с при частоте выборки отсчетов 10 кГц. За период дискретизации объект совершит перемещение $x=10^{-3}$ мм. Типичное значение

температурного ухода частоты ГУН составляет ~1 МГц/°С при рабочей частоте 6 ГГц [120]. Допустим, за период выборки температура изменилась на 0,1 °С, тогда уход длины волны зондирующего излучения σ_{λ} составляет ~10⁻³ мм. Таким образом, вклад погрешности определения длины волны в погрешность определения перемещения составит ~4.10⁻⁸ мм.

В работе [121] приведено выражение для оптимальной оценки фазы гармонического сигнала длительностью (2*T*):

$$\tilde{\varphi} = \operatorname{arctg}\left\{\frac{\int_{-T}^{T} x(t)\sin\omega_0 t \, dt}{\int_{-T}^{T} x(t)\cos\omega_0 t \, dt}\right\},\tag{4.2.5}$$

где числитель и знаменатель дроби – выходные сигналы квадратурного демодулятора с полосой пропускания выходного УНЧ (по первому нулю АЧХ) равной 1/*T*. Для гармонического сигнала погрешность определения фазы равна нулю, т.к. по трём отсчетам синусоиды величина ф может быть точно определена.

В реальном эксперименте вместо чистой синусоиды интерферометр принимает сигнал в виде аддитивной смеси случайного узкополосного процесса, несущего информацию об исследуемом объекте, и гауссова шума. Если время корреляции случайного узкополосного процесса сравнимо со временем анализа сигнала, т.е. амплитуда, начальная фаза и частота мало меняются на интервале анализа, то потенциальная погрешность (СКО) измерений фазы определяется отношением мощности аддитивного шума к энергии полезного сигнала [121]:

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{N_0}{2E}},\tag{4.2.6}$$

где *E* – энергия сигнала, а *N*₀ – спектральная плотность мощности шума. Таким образом, вклад погрешности определения фазы сигнала в погрешность определения перемещения определяется как

$$\sigma_x = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{N_0}{2E}}.$$
(4.2.7)

Из данного соотношения следует, например, что для получения погрешности измерения $\sigma_x = 0,01\lambda$ требуется обеспечение отношения сигнал-шум ~18 дБ. Отношение сигнал-шум для процессов с медленно меняющейся фазой

может быть повышено за счет увеличения длительности интервала анализа сигнала.

Пусть на вход квадратурного демодулятора поступает сигнал, представляющий собой гармонические колебания мощностью 100 мкВт. Энергия сигнала на интервале между соседними отсчетами при частоте выборки отсчетов 10 кГц составляет 10⁻⁸ Вт·с. УВЧ в рабочей полосе частот ГУН имеет коэффициент шума 5,2 дБ и коэффициент усиления 16 дБ, коэффициент шума квадратурного демодулятора 15,5 дБ. При T=290 K, N₀ \approx 2·10⁻¹⁸ Вт/Гц. При данных условиях обеспечивается погрешность определения перемещения 2 $\sigma_x \approx$ 8·10⁻⁵ мм.

Из соотношения (4.2.6) следует, что рабочую длину волны датчика следует выбирать как можно меньше. С другой стороны, с уменьшением длины волны в СВЧ и тем более в КВЧ диапазоне резко возрастают потери в гидрометеорах. Так как вероятность появления интенсивных осадков возле наружных стен высотных зданий и сооружений весьма высока, с учетом известных экспериментальных данных об ослаблении радиоволн различных диапазонов в атмосферных осадках [123, 124], значение рабочей длины волны макета выбрано в интервале 50-60 мм, должно обеспечить удовлетворительную погрешность что измерения перемещения реперных точек поверхности контролируемого объекта порядка 0,1 мм при соответствующем отношении сигнал-шум. Дополнительным основанием такого выбора рабочей длины волны является снижение стоимости для производства и комплектующих изделий для приемопередающего оборудования этого достаточно распространенного диапазона.

Частоты передатчиков работающих в паре ППБ расстраивались на малую величину ($f_{\Pi \Psi} \approx 25 \text{ к}\Gamma \Psi$). До уровня нормальной работы АЦП эти сигналы усиливались дополнительными усилителями с рабочей полосой частот от 1 до 10 000 кГ Ψ (T = 0,1 мкс). Оцифровка проводилась с частотой 100 МГ Ψ , что позволяло иметь на одном периоде колебания ПЧ не менее нескольких тысяч отсчетов квадратур без эффекта наложения шумов. Малое приращение фазы колебания промежуточной частоты на интервале дискретизации позволило

использовать приближение $\varphi \approx \operatorname{arctg}(\varphi)$ с высокой точностью при вычислении приращения фазы сигналов ПЧ на одном интервале дискретизации (см. ф-лы 4.2.8 – 4.2.9). С увеличением отношения сигнал/шум распределение вероятности фазового шума асимптотически стремится к гауссовому с СКО (4.2.6). Для уменьшения избыточности измерительной информации и повышения отношения сигнал/шум на 30 дБ выполняется децимация с усреднением по 1000 отсчетов.

Реализованный в устройстве принцип работы «с активным ответом» позволяет измерить взаимное смещение элементов конструкции, удаленных друг от друга на значительное расстояние, которое определяется только энергетическим потенциалом используемых приемопередатчиков и размерами самого сооружения.

Для обеспечения электромагнитной совместимости между датчиками в составе МРИС, приемопередающие устройства должны работать на разных частотах и иметь большое переходное затухание между передающими и устройств. приемными антеннами соседних Антенны co средней направленностью (коэффициент усиления антенны интервале лежит В 10-15 дБ) способны обеспечить требуемую развязку при условии разнесения приемных передающих И антенн ПО ортогональным поляризациям. Дополнительным фактором увеличения развязки между антеннами соседних линий визирования является пространственное разнесение антенн.

Для этого одно из двух (или оба) попадающих в один узел силового каркаса приемопередающих устройств можно сместить вдоль несущей балки, как показано на рисунке 4.2.2.

87



Рисунок 4.2.2 – Схема линий визирования МРИС на каркасе секции здания с учетом требований ЭМС

Для проведения модельных экспериментов была создана МРИС на основе набора макетов СВЧ интерферометров (рисунок 4.2.3). Реализованные макеты отличаются малой дальностью действия (до 1 м), что связано с масштабным соотношением в размерах реального здания и экспериментального стенда 50:1.

В составе ППБ использованы генераторы управляемые напряжением (ГУН) с буферизирующим усилителем производства фирмы Hittite HMC431. Диапазон рабочих частот генератора от 5,5 ГГц до 6,1 ГГц, выходная мощность 1,5 мВт. В качестве УВЧ применяются усилительные блоки производства фирмы Analog Devices ADL5545 с коэффициентом усиления в рабочей полосе частот 16 дБ. В качестве приемных блоков использованы квадратурные демодуляторы ADL5380, рабочий диапазон частот от 0,4 ГГц до 6 ГГц, с чувствительностью 10⁻¹² Вт при полосе частот принимаемого сигнала до 10 МГц. Приемные и передающие антенны изготовлены в виде единых конструктивных блоков с использованием печатной технологии. Измерения проводились на длинах волн от 50 до 54,5 мм.



Рисунок 4.2.3 – Общий вид ППБ макета двухпозиционного СВЧ интерферометра

В состав цифрового блока, подключаемого к каждому приемопередатчику, входят два АЦП, синхронизируемые от опорного кварцевого генератора, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), микроконтроллер и интерфейс для подключения к локальной сети. В цифровом блоке макета СВЧ интерферометра происходит оцифровка, выделение квадратурных компонент разности фаз сигналов ПЧ. Алгоритм обработки и преобразования сигнала интерферометра имеет целью преобразовать сигналы ПЧ интерферометров, в величину взаимного смещения двух ППБ, закрепленных на элементах конструкции.

Обозначим квадратурные выходные цифровые сигналы двухканального АЦП ППБ1 символами I_i и Q_i , выходные цифровые сигналы двухканального АЦП ППБ2 символами I_i и Q_i , где i – номер отсчета. Приращения фазы принятых приемными устройствами сигналов за время $\Delta t_{\text{дискр}} = t_{i+1} - t_i$ вычисляются с помощью ПЛИС, входящих в состав ЦБ:

$$\Delta \Phi 1_{i+1} = \frac{Q 1_{i+1} I 1_i - Q 1_i I 1_{i+1}}{I 1_i I 1_{i+1} + Q 1_i Q 1_{i+1}},$$

$$\Delta \Phi 2_{i+1} = \frac{Q 2_{i+1} I 2_i - Q 2_i I 2_{i+1}}{I 2_i I 2_{i+1} + Q 2_i Q 2_{i+1}}.$$
(4.2.8)

Далее в ПЛИС выполняется операция децимации с усреднением, что с одной стороны уменьшит высокочастотные шумы в получаемых оценках приращения фаз, с другой стороны существенно снизит скорость поступления и объем передаваемой к центральной ЭВМ информации.

$$\Delta \Phi \mathbf{1}_{k} = \sum_{i=kN}^{(k+1)N} \Delta \Phi \mathbf{1}_{i},$$

$$\Delta \Phi \mathbf{2}_{k} = \sum_{i=kN}^{(k+1)N} \Delta \Phi \mathbf{2}_{i},$$
(4.2.9)

Отсчеты $\Delta \Phi 1_k$ и $\Delta \Phi 2_k$ передаются от ППБ 1 и 2 в центральную ЭВМ по локальной сети и преобразуются в задаваемую таблицей функцию взаимного смещения элементов конструкции по формуле

$$x(kT) = (\lambda/4\pi) (\Delta \Phi 1_k - \Delta \Phi 2_k), \quad k = 1, 2, ..., n, ...$$
(4.2.10)

Полученная таким образом зависимость взаимного смещения элементов конструкции от времени для каждой пары ППБ из состава МРИС используется для вычисления смещений элементов конструкции.

На центральной ЭВМ МРИС происходит сбор данных от всех компонентов МРИС и вычисление зарегистрированных смещений при помощи разработанного соискателем ПО[А9].

4.3 Контрольно-измерительное оборудование и погрешности измерений

В контрольно-измерительного оборудования качестве В ходе набор экспериментальных исследований использовался трех ИЗ радиоинтерферометров 3-миллиметрового диапазона длин волн ФМК-301 [125], разработанных фирмой «АФС52» на основе приёмо-передающего устройства [14]. Метрологические характеристики данного прибора подтверждены свидетельством об утверждении типа средства измерения [126].



Рисунок 4.3.1 – Внешний вид (а) и структурная схема (б) КВЧ радиоинтерферометра ФМК-301

КВЧ радиоинтерферометр ФМК-301 работает по принципу супергетеродина. Структурная схема прибора приведена на рисунке 4.3.1 б). Задающий генератор, работающий на фиксированной частоте (в диапазоне от 93 до 94 ГГц, длина волны 3,2 мм) Г1, через ДВ передает электромагнитную волну на передающую антенну А1, направленную на исследуемый объект. Часть Д1 ДB мощности поступает на детектор через ответвитель на O1. Электромагнитная волна, отраженная от исследуемого объекта, поступает на приемную антенну А2 и через ДВ поступает на детектор Д2. Через ответвитель О2 отраженная волна приходит на вход детектора Д1. Кроме того, по петле из ДВ в Д1 и Д2 поступают сигналы гетеродина Г2, работающего на фиксированной частоте и отстроенного от Г1 на 100 МГц.

Д1 и Д2 – однодиодные амплитудные детекторы, которые на выходе формируют сигналы промежуточной частоты (ПЧ). Эти сигналы сдвинуты друг относительно друга по фазе на величину, пропорциональную перемещению исследуемого объекта и поступают в блок обработки (БО). Там происходит их оцифровка, выделение квадратурных компонент разности фаз сигналов ПЧ и передача их на центральную ЭВМ. На центральной ЭВМ происходит вычисление перемещения исследуемого объекта.

Максимальное значение СКО перемещения, зафиксированное при калибровке КВЧ радиоинтерферометра с помощью горизонтального длинномера (государственного эталона единицы длины 4 разряда) составило S_{max} = 7,1 мкм.

Для определения метрологических характеристик двухпозиционного интерферометра сантиметрового диапазона измерялось перемещение двух неподвижных ППБ на протяжении 1 часа 6 раз по 1000 отсчётов. Для каждой серии были вычислены средние значения (m_i) и среднеквадратичные отклонения (σ_i). За случайную составляющую погрешности принималось максимальное значение СКО за часовой интервал, за систематическую погрешность принималась максимальная разность средних значений за часовой интервал.

Результаты расчётов статистических параметров выборки представлены в таблице 4.3.1.

Осциллограмма длительной (более 7 часов) записи сигналов трех неподвижных двухпозиционных интерферометров из состава МРИС приведена на рисунке 4.3.2. На данном графике в начале и середине записи видны отметки от непреднамеренных внешних ударных воздействий. Эти участки удалены из последующего анализа.

Таблица 4.3.1 Оценка погрешности двухпозиционных интерферометров

Интервал	<i>m</i> ₁ (мм)	σ1 (мм)	<i>m</i> ₂ (мм)	σ ₂ (мм)	<i>m</i> ₃ (мм)	σ ₃ (мм)
(сек)						
1000-1001	0,0112	0,0188	0,0141	0,0116	-0,0111	0,0566
5000-5001	0,0045	0,0154	0,0175	0,01105	-0,0251	0,0622
10000-10001	0,0257	0,0146	0,0024	0,0087	-0,0292	0,0675
15000-15001	0,0311	0,0258	0,0100	0,0191	-0,0206	0,0732
20000-20001	-0,0179	0,0031	0,0064	0,0017	0,0164	0,0032
25000-25001	-0,0179	0,0031	0,0064	0,0015	0,0138	0,0029
0.0720		0.0057 (0540		

 $\sigma_{\text{макс}} = 0,0732 \text{ мм}; \Delta m_{\text{max}} = 0,0257 \text{ - } (-0,0292) = 0,0549 \text{ мм}.$



Рисунок 4.3.2 – Длительная запись сигналов неподвижных двухпозиционных интерферометров

Осциллограмма длительной (более 7 часов) записи сигналов ФМК-301 при отсутствии преднамеренного внешнего воздействия приведена на рисунке 4.3.3. На данном графике также видны отметки от непреднамеренных внешних ударных воздействий. Эти участки удалены из последующего анализа. Разброс выборки отсчётов оказался весьма мал, поэтому была сделана общая оценка погрешности измерения перемещения с помощью ФМК-301, включающая как систематическую, так и случайную составляющие, $\sigma_{\text{макс}} = 0,015$ мм.

Суммарная погрешность трех двухпозиционных интерферометров сантиметрового диапазона из состава МРИС оказалась менее 0,13 мм. Суммарная погрешность контрольного прибора миллиметрового диапазона не превышает 0,015 мм, то есть на порядок ниже, чем суммарная погрешность МРИС, что соответствует соотношению длин волн зондирующего излучения, исследуемого и контрольного приборов.



Рисунок 4.3.3 – Длительная запись сигнала ФМК-301 в отсутствие внешних воздействий

4.4 Модельные эксперименты

При помощи описанной МРИС была проведена серия модельных экспериментов по сбору и обработке данных о деформациях элементов конструкций. Общий вид экспериментального стенда изображен на рисунке 4.4.1. В состав экспериментального стенда, входят следующие компоненты: масштабная (1:50) модель каркаса высотного здания (1) с размещенной на ней системой из трёх двухпозиционных интерферометров; вибростенд (2); стойка с контрольноизмерительным оборудованием (3); сетевой концентратор и центральная ЭВМ МРИС (4).

Масштабная модель каркаса высотного здания выполнена из четырёх стальных вертикальных стоек высотой 2 м и шести горизонтальных стальных плит с рёбрами жесткости с размерами (1000×400) мм, расположенных эквидистантно. На 5 – 4, 4 – 3 и 3 – 2 этажах каркаса установлены ППБ двухпозиционных интерферометров. Каждая пара ППБ одного интерферометра сориентирована навстречу друг другу с линией визирования под углом 45 градусов к горизонту. Масштабная модель размещена на подвижной платформе (тележке) вибростенда.

Вибростенд предназначен осуществления периодического для квазигармонического воздействия модель Он на каркаса. состоит ИЗ неподвижного массивного основания, металлической тележки, двухскоростного привода в виде двух редукторов с разными передаточными числами, кривошипными передачами вращательного движения в поступательное, и электродвигателя с регулируемым количеством оборотов.

Кроме того, в состав экспериментального стенда входит стальной трос с талрепом (5), предназначенный для создания статических деформаций каркаса.



Рисунок 4.4.1 – Общий вид экспериментального стенда

Стойка контрольно-измерительного оборудования была установлена на независимом основании и укомплектована тремя КВЧ интерферометрами, описанными в предыдущем разделе. Антенны каждого них были направлены на боковые поверхности горизонтальных плит 1-го, 3-го и 4-го этажей каркаса. Таким образом, с помощью контрольно-измерительного оборудования можно измерять независимые перемещения горизонтальных плит относительно неподвижной системы координат.

В ходе первого эксперимента были зарегистрированы собственные затухающие колебания конструкции. Для этого по основанию модели каркаса был нанесён удар с помощью молотка. Осциллограмма колебаний, зарегистрированных двухпозиционным интерферометром, расположенным между 1 и 2 этажом, приведена на рисунке 4.4.2.



Рисунок 4.4.2 – Осциллограмма собственных затухающих колебаний макета.

Второй эксперимент собственных состоял определении частот В масштабной модели каркаса высотного здания. Для этого модель каркаса подвергалась периодическому квазигармоническому воздействию на вибростенде, работающем с малым редуктором. При этом обеспечивался спектр воздействий от 1 до 20 Гц с шагом примерно 0,5 Гц. Измерения на каждой частоте воздействия течение одной минуты. Регистрировались проводились В показания двухпозиционного интерферометра между четвёртым и третьим этажами модели Ha контрольных приборов. рисунке 4.4.3 каркаса, И представлены осциллограммы, полученные при частоте воздействия 1,08 Гц: с контрольных приборов (красный – колебания основания макета, т.е. внешнее воздействие, зелёный – колебания плиты третьего этажа, синий – колебания плиты четвёртого этажа) и осциллограмма сигнала двухпозиционного интерферометра между 4-м и 3-м этажами.





Рисунок 4.4.3 – Сигналы контрольных приборов при частоте 1,08 Гц (а); сигнал двухпозиционного интерферометра между 4-м и 3-м этажами (б)

Аналогичные осциллограммы при частотах воздействия 4,77 и 12,84 Гц представлены на рисунке 4.4.4 и 4.4.5 соответственно.



Время, с Рисунок 4.4.4 – Сигналы контрольных приборов при частоте 4,77 Гц (а);





Рисунок 4.4.5 – Сигналы контрольных приборов при частоте 12,84 Гц (а); сигнал двухпозиционного интерферометра между 4-м и 3-м этажами (б)

По результатам всей серии измерений были построены зависимости амплитуды колебаний макета от частоты внешнего воздействия, представленные 4.4.6. Спектр, полученный при рисунке помощи двухпозиционных на интерферометров показан сиреневым цветом (минимальные значения амплитуд). Спектр зарегистрированных с помощью контрольных приборов колебаний основания каркаса – красным цветом, 3-го и 4-го этажей – синим и зеленым соответственно. В ходе эксперимента выяснилось, что амплитуда сигнала двухпозиционных интерферометров всегда меньше разности сигналов двух контрольных приборов; объяснение этого факта приведено ниже.



Рисунок 4.4.6 – Зависимости амплитуды колебаний от частоты внешнего воздействия, зарегистрированные двухпозиционными интерферометрами (сиреневый) и контрольными приборами (красный, зеленый, синий)

По полученным спектрам были определены собственные частоты модели каркаса в диапазоне от 1,0 до 20 Гц и проведено сравнение с теоретической оценкой, полученной Д.В. Баландиным [10]. Результаты приведены в таблице 4.4.1.

Таблица 4.4.1 Собственные частоты масштабной модели каркаса высотного здания

Номер	Собственная частота [Гц],	Собственная частота	Разность
тона	теоретическая оценка	[Гц], эксперимент	оценок [Гц]
1	5.3479	5,28	0,0679
2	13.6296	13,84	-0,2104

100

Экспериментально измеренные собственные частоты масштабной модели каркаса высотного здания хорошо согласуются с их теоретической оценкой, расхождение оценок не превысило 1,5%.

проведении эксперимента было При ЭТОГО выяснено, что при периодическом квазигармоническом внешнем воздействии разность горизонтальных смещений третьего и четвёртого этажей модели каркаса, измеренная с помощью двух контрольных приборов, отличается от величины взаимного смещения двух ППБ двухпозиционного интерферометра, размещённых на горизонтальных плитах третьего и четвёртого этажей модели, как по амплитуде, так и по фазе. Степень такого отличия зависит от частоты воздействия. Это объясняется тем, что контрольные приборы размещаются на независимом основании и регистрируют сумму перемещений изгибных колебаний каркаса на различных модах и перемещений, связанных с вращательными колебаниями каркаса как абсолютно жёсткого тела относительно точки его опоры. Тогда как закреплённый на каркасе макет двухпозиционного интерферометра реагирует только на упругие деформации (изгибные колебания) каркаса, оставаясь нечувствительным к вращательным колебаниям каркаса, как абсолютно жёсткого тела. С изменением частоты внешнего квазигармонического воздействия меняется состав и комплексные коэффициенты мод изгибных колебаний, что приводит к изменению амплитудных и фазовых соотношений. На самых низких частотах амплитуда изгибных колебаний очень мала, при приближении к резонансу эта амплитуда растёт, узлы и пучности таких колебаний перемещаются по высоте каркаса.

Количественно оценить эффект расхождения показаний двухпозиционных интерферометров и контрольных приборов проще всего при статических деформациях каркаса, что и было сделано в третьем эксперименте. Для реализации статических смещений и деформаций к верхней части модели каркаса и левому краю неподвижного основания стенда был прикреплён стальной трос, оснащённый талрепом. При натяжении троса модель каркаса слегка наклонялась и испытывала упругие деформации.



Рисунок 4.4.7 – Осциллограммы сигналов контрольных приборов при статическом нагружении каркаса (1 этаж – красный, 3 этаж – зеленый, 4 этаж – синий)



Рисунок 4.4.8 – Осциллограмма сигнала двухпозиционного интерферометра при статическом нагружении каркаса (между 3 и 4 этажами)

На рисунке 4.4.8 показана осциллограмма сигнала двухпозиционного интерферометра между третьим и четвертым этажами каркаса. Её необходимо сравнить с зелёным (3 этаж) и синим (4 этаж) графиками контрольных приборов на рисунке 4.4.7.

В момент максимального нагружения горизонтальное смещение четвёртого этажа, измеренное контрольным прибором, составило 10,2 мм, третьего этажа – 7,9 мм, а взаимное смещение ППБ двухпозиционных интерферометров на 3-4 этажах составляет всего 0,55 мм. Так как процесс нагружения идёт очень медленно, практически с нулевой частотой, изгиб вертикальных балок каркаса практически статичен, наблюдаются только мелкие колебания на собственной частоте 5,28 Гц. При этом, зная не только горизонтальное смещение, но и высоту этажей, можно разделить между собой поворот каркаса вокруг неподвижной горизонтальной оси, проходящей через точку опоры, и изгиб вертикальных балок.

На рисунке 4.4.9 изображена парабола, проведённая через три точки вертикальной балки, горизонтальные координаты которых определены по показаниям контрольных приборов, а вертикальные измерены после сборки каркаса. Через крайние точки проведена секущая прямая, соответствующая повороту бесконечно жёсткой балки. Таким образом, определена стрела прогиба балки: её величина равна 0,52 мм, что согласуется с показаниями двухпозиционных интерферометров 0,55 мм.

Полученный в этом эксперименте результат показывает, что существенным отличием МРИС, имеющей кинематическую связь с контролируемым объектом, от системы, расположенной на независимом основании, является ее нечувствительность к наклонам объекта контроля как абсолютно жёсткого тела.



Рисунок 4.4.9 – Соотношение между наклоном (прямая линия) и изгибом (парабола) вертикальной балки каркаса

Выводы

В четвертой главе диссертации получены следующие результаты.

Реализована МРИС малой дальности действия для измерения динамических параметров конструкций. МРИС создана на основе набора датчиков смещения, представляющих собой микроволновые интерферометры с двумя приемопередающими блоками, находящимися в кинематической связи с конструкцией.

Разработан метод измерения взаимных смещений элементов конструкции, находящейся под внешним динамическим воздействием. Регистрация колебаний по трем взаимно перпендикулярным осям дает возможность оценить вектор горизонтального сдвига верхней плоскости секции здания относительно нижней и угол скручивания конструкции вокруг вертикальной оси симметрии. Измеренные таким образом смещения позволяют определить параметры собственных колебаний здания, а измерительные данные МРИС могут быть использованы для формирования управляющих сигналов систем активного управления колебаниями зданий.

двухпозиционными Оценена погрешность измерения смещения интерферометрами, она составила не более 0,1 мм. Оценка проводилась в продолжительном статическом эксперименте. Проведена серия экспериментальных исследований регистрации при помощи МРИС ПО собственных и вынужденных колебаний конструкций, а также статических деформаций элементов каркаса зданий и сооружений. Определены собственные частоты макета.

Кроме того, экспериментально продемонстрирована возможность контроля сложных перемещений (совокупности поступательных, вращательных движений и деформации) элементов конструкций при помощи набора интерферометров трехмиллиметрового диапазона, расположенных на независимом основании. Результаты измерения МРИС и контрольных приборов согласуются между собой.

Основные результаты, полученные в 4 главе диссертации, опубликованы в докладе [A14], статье [A4]. Соискатель является автором программного обеспечения [A9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В лабораторных условиях реализована разработанная методика калибровки радиометрического канала В составе комплекса активно-пассивного микроволнового зондирования в присутствии мощной переменной помехи со стороны активного канала. Создано программное обеспечение для определения термодинамической температуры газодинамического процесса на основе данных Ha трехмиллиметрового радиоинтерферометра-радиометра. данных газодинамического эксперимента продемонстрировано, что разработанные методика калибровки радиометрического канала и алгоритм определения термодинамической позволяют использовать интерферометр температуры трехмиллиметрового для синхронного активно-пассивного диапазона микроволнового зондирования динамических объектов в общем частотном диапазоне на малой дальности.

Разработан метод восстановления двумерного поля температуры фронта быстропротекающего газодинамического процесса по результатам измерения многоканальным радиометром. Предлагаемый метод основан на модифицированной сплайн-аппроксимации С весовыми коэффициентами, ДН антенн. При помощи компьютерного моделирования определяемыми разработанный метод работоспособен показано, что при произвольном перекрытии ДН антенн радиометра и их произвольной ширине, не выходящей за пределы исследуемого объекта, а также обладает точностью, позволяющей сокращать количество измерительных каналов радиометра (с 16 до 9 в конкретных условиях численного эксперимента).

Экспериментально реализован разработанный метод непрерывных измерений смещения элементов конструкций при помощи МРИС на основе радиоинтерферометров сантиметрового диапазона с двумя разнесенными ППБ, имеющих кинематическую связь с исследуемым объектом. Показано, что МРИС позволяет регистрировать собственные и вынужденные колебания конструкций в широком диапазоне частот и скоростей смещения, а также статические деформации элементов каркаса зданий и сооружений с погрешностью не хуже 0,1 мм. Продемонстрирована возможность контроля сложных перемещений (совокупности поступательных, вращательных движений и изгиба) элементов конструкций при помощи набора интерферометров трехмиллиметрового диапазона, размещенных на независимом основании.

Таким образом, при выполнении диссертационной работы были решены сформулированные во введении задачи исследования обсуждаемых классов сложных динамических объектов методами микроволновой радиоинтерферометрии и радиометрии на малой дальности. В результате установлены возможности, ПУТИ И области новые применения ДЛЯ многоканальных систем микроволнового зондирования малой дальности.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АП аттенюатор поляризационный
- АЦП аналогово-цифровой преобразователь
- АЧТ абсолютно черное тело
- АЧХ амплитудно-частотная характеристика
- ГУН генератор управляемый напряжением
- ГШ генератор шума
- ДВ диэлектрический волновод
- ДМ делитель мощности
- ДН диаграмма направленности
- КВЧ крайне высокие частоты
- КСВН коэффициент стоячей волны по напряжению
- ЛПД лавинно-пролетный диод
- МРИС многоканальная радиоинтерферометрическая система
- НО направленный ответвитель
- ПЛИС программируемая логическая интегральная схема
- ПП приемопередатчик
- ППБ приемопередающий блок
- ПЧ промежуточная частота
- СВЧ сверхвысокие частоты
- СКО среднеквадратичное отклонение
- СМЗ система микроволнового зондирования
- ТНТ тринитротолуол
- УВЧ усилитель высокой частоты
- УПЧ усилитель промежуточной частоты
- ФАПЧ фазовая автоподстройка частоты
- ФД фазовый детектор
- ЭВМ электронно-вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоус, А.И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. В 2-х книгах. Книга 1/ А.И. Белоус, М.К. Мерданов, С.В. Шведов – М.: Техносфера, 2018. – 818 с.
- Канаков, В.А. Методы микроволнового зондирования, устойчивые к изменению условий измерения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03/ Канаков Владимир Анатольевич. – Н. Новгород, 2011. – 408 с.
- Методы извлечения информации о перемещении границ раздела в газодинамических экспериментах с использованием радиоинтерферометров миллиметрового диапазона длин волн/ В.А. Канаков [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2008. – №3 (51). – С. 234-246.
- Состояние и перспективы развития микроволновой радиоинтерферометрии для диагностики газодинамических процессов/ В.А. Канаков [и др.] // Антенны. – 2016. – №1 (221). – С. 49-54.
- 5. Зельдович, Я.Б., Райзер, Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 686 с.
- Краус, Дж. Д., Радиоастрономия. Пер. с англ. под ред. Железнякова В.В. М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
- 7. Многоканальная радиоинтерферометрия – метод диагностики изменения фронтов ударноволновых и детонационных процессов. Концепция и подтверждение/ С.В. Труды экспериментальное Катин Ги дp.] Международной конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2009. – С. 617– 621.
- 8. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов/ В.М. Бельский [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2011. – № 6 (47). – С. 29-41.
- Wu, L., Casciati, F. Local positioning systems versus structural monitoring: a review// Struct. Control Health Monit. – 2014. – №21. – p.1209–1221 DOI: 10.1002/stc.1643.
- Исследование и разработка комплекса научно-технических решений микроволнового зондирования для активного управления колебаниями зданий и сооружений: отчет о НИР/ Баландин Д.В. [и др.] – Н. Новгород: ННГУ, 2017. – 83 с.
- Финкельштейн, М.И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 536 с.
- 12. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 1 М.: Техносфера, 2014. 672 с.
- Патент 2569581. Российская Федерация. МПК Н01Р5/00. Микроволновый одноканальный радиоинтерферометр с волноведущим зондирующим трактом: №2013152801/08, заявл. 2013.11.27, опубл. 2015.11.27/ Ю.И. Орехов, А.В. Марков, Н.С. Корнев [и др.].
- Патент 2569936. Российская Федерация. МПК G01S13/02, H01P1/02. Приёмопередающее устройство для фазометрических систем миллиметрового диапазона длин волн: №2014122368/28 заявл. 2014.06.02, опубл. 2015.12.10/ В.А. Канаков, В.Ф. Взятышев, Ю.И. Орехов [и др.].
- Бендат, Дж., Пирсол, А. Применения корреляционного и спектрального анализа. Пер. с англ. – М.: Мир. 1983. – 312 с.
- Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. под ред. И.С. Рыжака – М.: Мир. 1990. – 584 с.
- 17. Витриченко, Э.А. Проблемы оптического контроля/ Э.А Витриченко, В.П. Лукин, Л.А. Пушной, В.А. Тартаховский. Новосибирск: Наука, 1990. 351 с.
- Гуров, И.П. Помехоустойчивый фотоэлектрический метод измерения фазовых характеристик интерференционной картины/ И.П. Гуров // Метрология. –1986. – №7. – С. 8-16.

- Гуров, И.П. Методы и техника автоматической обработки сигналов в интерференционных измерительных системах/ И.П. Гуров // Измерения, контроль, автоматизация. –1990. – №. 2 (74). – С. 69-79.
- 20. Васильев, В.Н., Гуров, И.П. Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. СПб.: БХВ, 1998. 240 с.
- Родионов, А.В. Методы обработки результатов радиоинтерферометрических измерений параметров газодинамических процессов/ А.В. Родионов, В.А. Канаков, С.Ю. Лупов // Труды Международной конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2005. – с. 680-685.
- Пархачёв, В.В. Применение методов многомодовой радиоинтерферометрии в диагностике газодинамических процессов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03/ Пархачёв Владимир Владимирович. – Нижний Новгород, 2009 г., – 125 с.
- Koch, B. C. Reflexion de micro-ondes par des phenomenes de detonation //C. R. Acad. Sci. Paris. 1953. V. 236. P. 661-663.
- Cawsey, G.F. Observations of detonation in solid explosives by microwave interferometry / G.F. Cawsey, J.L. Farrands, S. Thomas // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A: Mathematical and Physical Sciences. – 1958. – V. 248. – P. 499-521.
- Cook, M.A., Measurement of detonation velocity by Doppler effect at threecentimeter wavelength/ M.A. Cook, R.L. Doran, G.J. Moris, // J. Appl. Phys. – 1955. – V.26, № 3. – P. 359-371.
- Court, G.W. A simplified form of microwave interferometer for speed measurements// J. Sci. Instrum. – 1955. – V.32. Sept. – P. 354-356.
- 27. Dean, D.S., Green, D.T. The use of microwaves for the detection of flaws and measurement of erosion rates in materials// J. Scient. Instrum. 1967. V. 44, №. 9. P. 699-701.
- Tevelow F.L. Microwave interferometer measurements in shocked air// J. Appl. Phys. – 1967. – V. 38. № 4. – P. 1765-1780.

- McCall, G.H. Microwave interferometer for shock wave, detonation and material motion measurements / G.H. McCall, W.L. Bongianni, G.A. Miranda // Rev. Sci. Instrum. – 1985. – № 8. – P. 1612-1618.
- Баталов, С.В., Радиоволновой метод исследования физических явлений и химических превращений в гетерогенных ВВ под действием УВ/ С.В. Баталов, В.П. Филин, В.В. Шапошников // Физика горения и взрыва. 1991. № 6 (27). с. 107-109.
- Krall, A.D., Microwave interferometry of shock waves. 1. Unreacting porous media/ A.D. Krall, B.C. Glancy, H.W Sandusky // J. Appl. Phys. – 1993. – V. 74, Nov. № 10. – P. 6322-6327.
- ИΦВ РФЯЦ-ВНИИЭФ 32. Некоторые результаты применения В радиоинтерферометров MM диапазона волн длин для изучения газодинамических процессов/ А.Л. Михайлов Ги дp.] // Труды конференции «Экстремальные Международной состояния вешества. Детонация. Ударные волны». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2005. – С. 649-654.
- 33. Панкратов, А.Г. Зондирующие устройства микроволновой РИ на диэлектрических волноводах для исследования объектов на значительных расстояниях / А.Г. Панкратов, С.С. Чуркин // Сборник тезисов докладов Международной конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. – 2013. – С. 360-361.
- 34. Перспективы использования биорадаров миллиметрового диапазона/ С.С. Чуркин, В.А. [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 7. С. 64-72
- 35. Пархачёв, В.В. Применение радиоинтерферометра для измерения скорости свободной поверхности в плосковолновом эксперименте/ В.В. Пархачёв [и др.] // Проблемы прочности и пластичности. 2018. № 101. Т. 80. С. 118-126.
- 36. Канаков, В.А. Анализ возможностей измерения параметров сложного движения отражающих поверхностей многоканальным интерферометром с

независимыми и взаимно откалиброванными каналами / В.А. Канаков, В.В. Пархачёв // Вестник ННГУ. – 2011. – № 3. – С. 84–90.

- 37. Стратегия выбора структуры и параметров волновой подсистемы многоканальных радиоинтерферометров/ С.В. Катин [и др.] // Труды Международной конференции «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С.670-674.
- 38. Патент 2621473 Российская Федерация МПК G01M7/00, G01S13/36 Устройство для дистанционного измерения взаимных смещений элементов конструкции зданий и сооружений: №2016128649, заявл. 2016.07.13, опубл. 2017.06.06 / В.А. Канаков
- Орленко, Л.П. Физика взрыва и удара. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 304 с.
- Кисляков, А.Г. Введение в радиоастрономию. Часть 2. Техника радиоастрономии/ А.Г. Кисляков, В.А. Разин, Н.М. Цейтлин. – Н.Новгород: ННГУ, 1996. – 195 с.
- 41. Канаков, В.А. Радиометр восьмимиллиметрового диапазона длин волн. Н.Новгород: ННГУ, 1996. – 20 с.
- 42. Испускательная способность// Физическая энциклопедия. М., 1990. т. 2, с. 219.
- 43. Горелик, А.Г. Радиометрическое исследование импульсного микроволнового излучения / А.Г. Горелик, Т.А. Семенова, В.Б. Соколов [и др.] // Инженерная физика. – 2002. – № 1. – С. 2-10
- Федоров, В.Ф. Микроволновое излучение, возбуждаемое в воздухе высокоэнергетичными нестационарными источниками/ В.Ф. Федоров // Физические принципы определения параметров состояния атмосферы и океана: сборник научных трудов № 0186.0076148. М.: МИФИ, 1991. С. 17–32
- 45. Федоров, В.Ф. ЭМИ в микроволновом диапазоне, возбуждаемый асимметричным нестационарным источником гамма-излучения / В.Ф. Федоров // Известия вузов. Радиофизика. 1991. №10,11,12. С. 1116-1119.

- 46. Федоров, В.Ф. О решении уравнения переноса микроволнового излучения воздушной плазмы, образованной источником гамма-излучения/ В.Ф. Федоров, Т.А. Семенова // Научная сессия МИФИ - 1998: сборник научных трудов 4.2. – М.: МИФИ, 1998. – С. 114 - 116
- 47. Семенова Т.А. О микроволновом методе диагностики воздушной плазмы, образованной источником ионизирующего излучения/ Т.А. Семенова, В.Ф. Федоров // Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП - 98 «Плазма, XX в». – Петрозаводск, 1998. – С. 50-52.
- 48. Федоров, В.Ф. Определение параметров возвратного удара молнии по характеристикам регистрируемого электромагнитного импульса/ В.Ф. Федоров // Тез. докл. межведомств. сем. «Распространение километровых и более длинных радиоволн». – Санкт-Петербург, 1992.
- Федоров, В.Ф. Миллиметровое электромагнитное излучение молниевого разряда / В.Ф. Федоров, Ю.А. Фролов, П.О. Шишков // Научная сессия МИФИ: сборник научных трудов 4.2. – М.: МИФИ, 1998. – С.116-118.
- Исследование импульсных источников СВЧ излучений радиометрическим методом/ В.Б. Соколов [и др.] //Мат. XVII конференции по распространению радиоволн. –Ульяновск. 1993.
- 51. О микроволновом излучении взрывающихся проволочек / В.Ф. Федоров [и др.] // Письма в ЖТФ. 1993. № 24. С. 1-4.
- 52. Mahadevan, R. Harmony in electrons: cyclotron and synchrotron emission by thermal electrons in a magnetic Field / R. Mahadevan, R. Narayan, I. Yi // Astrophys. J. – 1996. – V. 465. – P. 327-337.
- 53. Новый источник ультракоротких микроволновых импульсов, основанный на эффекте сверхизлучения субнаносекундных электронных сгустков / В.Г. Шпак [и др.] // Доклады Академии наук. 1999. № 1. С. 50-53
- 54. Корниенко, В.Н. Сверхизлучение циклотронных осцилляторов в электродинамической структуре / В.Н. Корниенко, В.А. Черепнин // Известия РАН. Серия физическая. – 1997. – № 12. – С. 2317-2322.

- 55. Генерация импульсов сверхизлучения сильноточными субнаносекундными электронными сгустками, движущимися в периодической замедляющей структуре / Н.С. Гинзбург [и др.] // Письма ЖТФ. – 1998. – № 18. – С. 7-13.
- 56. Гинзбург, Н.С. Сверхизлучение в ансамблях классических электронов осцилляторов в условиях группового синхронизма / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев // Известия вузов. Радиофизика. 1995. № 3-4. С. 292 297.
- 57. Гинзбург, Н.С. Циклотронное сверхизлучение движущегося электронного сгустка в условиях группового синхронизма / Н.С. Гинзбург, И.В. Зотова, А.С. Сергеев // Письма ЖЭТФ. – 1994. – № 7. – С. 501-505.
- 58. Experimental observation of super radiance in millimeter wave band / N.S. Ginzburg [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – V. 393, N 1-3. – P. 352 - 355.
- 59. Price, D. General scaling of pulse shortening in explosive emission driven microwave sources / D. Price, J.N. Benford // IEEE Transactions on Plasma Science. - 1998. - V. 26. - P. 256-262.
- High power short pulse generation at S band using a waveguide cavity with laser initiated discharge / P.J. Hackney [et al.] // Electronics Letters. – 1995. – V. 31. – P. 1263- 1264.
- Scenario or output pulse shortening in microwave generators driven by relativistic electron beams / N.F. Kovalev [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1998. – V. 26. – P. 246-251.
- 62. Генерация мощных наносекундных импульсов электромагнитного излучения
 / В.П. Губанов [и др.] // Письма ЖТФ. 1994. № 14. С. 89-93.
- 63. Гинзбург, Н.С. Генерация коротких электромагнитных импульсов электронным сгустком в замедляющей системе типа лампы обратной волны / Н.С. Гинзбург, Ю.В. Новожилова, А.С. Сергеев //Письма ЖТФ. 1996. № 9. С. 39-44.

- 64. Черенковское сверхизлучение субнаносекундного электронного сгустка в секционированной замедляющей системе / М.И. Яландин [и др.] // Письма ЖТФ. 1997. № 24. С. 14-19.
- 65. Loza, O.T. Experimental plasma relativistic microwave electronics / O.T. Loza,
 A.G. Shkvarunets, P.S. Strelkov // IEEE Transactions on Plasma Science. 1998.
 V. 26. P. 615-627.
- 66. Yin, H. A pseudospark cathode Cherenkov maser: theory and experiment / H. Yin, A.D.R. Phelps, W. He [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1998. – V. 407. – P. 175-180.
- 67. Спектральные характеристики плазменного СВЧ генератора / М.В. Кузелев [и др.] // Журнал экспериментальной и технической физики. 1996. № 6. С. 2048-2063.
- 68. Балакирев, В.А. Возбуждение электромагнитных импульсов релятивистскими электронными пучками / В.А. Балакирев, Г.Л. Сидельников // Письма ЖТФ. 1996. № 10. С. 45-49.
- 69. Altyntsev, A.T. On the microwave spike emission of the September 6, 1992 flare / A.T. Altyntsev, V.V. Grechnev, Y. Hamaoka // Sol. Phys. 1998. V. 1. P.137-151.
- 70. Comprehensive multiwavelength observations of the 1992 January 7 solar flare / A.V.R. Silva [et al.] // Astrophys. J. Supplem. 1996. V. 106, № 2. P. 621-646.
- 71. Мельников, В.Ф, Динамика энергичных электронов во вспышечной петле и уплощение частотного спектра мм излучения солнечных вспышек / В.Ф. Мельников, А. Магун, // Известия вузов. Радиофизика. 1996. № 11-12. С. 1456-1465.
- 72. Диагностика электрических токов в корональных магнитных полях / В.В.
 Зайцев [и др.] // Астрономический журнал. 1998. № 3. С. 455-466.

- 73. Melnikov, V.F, Spectral flattening during solar radio bursts at cm mm wavelengths and the dynamics of energetic electrons in a flare loop/ V.F. Melnikov, A. Magun, // Sol. Phys. 1998. V.178, № 1. P. 153-171.
- 74. Microwave mod coupling above active regions as a coronal density diagnostic / J. Lee [et al.] // Sol. Phys. 1998. V. 180, № 1-2. P.193-211.
- 75. Zhang, J. Spatial structure of Solar coronal magnetic loops revealed by transient microwave brightening/ J. Zhang, J.R. Lemen, // Sol. Phys. 1998. V. 180, № 1-2. P. 285 298.
- Нестеров, Н.С. О связи миллиметрового и мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек / Н.С. Нестеров, И.Г. Моисеев, А.А. Степанов // Письма в Астрофизический журнал. – 1998. – № 10. – С. 785-790.
- 77. Gopalswamy, N. Coronal dimming associated with a giant prominence eruption/
 N. Gopalswamy, Y. Hanaoka // Astrophys. J. 1998. V. 498, №2. P. 2.
- Silva, A.V.R. First images of impulsive millimeter emission and spectral analysis of the 1994 august 18 solar flare/ A.V.R. Silva, D.E. Gary // Sol. Phys. – 1997. – V. 175. – P. 157-173.
- 79. Исследование предвелышечных ситуаций по спектральным данным потоков радиоизлучения Солнца за 1970-1994 гг./ М.С. Дурасова [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. 1996. Т.39. № 11-12. С. 1466- 1472.
- 80. О возможности диагностики лазерной плазмы по регистрации микроволнового излучения / В.И. Вовченко [и др.] // Материалы конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП - 98 «Плазма, XX в». – Петрозаводск, 1998. – С. 45 - 47.
- 81. В.Φ. Федоров, Определение параметров лазерной плазмы по характеристикам микроволнового излучения/ В.Ф. Федоров // Физика быстропротекающих III плазменных процессов: тезисы доклада межреспубликанского семинара. – Гродно, 1992. – С. 3.
- 82. Федоров, В.Ф. Нагрев воздушной плазмы, образованной источником длиннопробежного излучения/ В.Ф. Федоров, Л.В. Левахина//

Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой: тезисы доклада V конференции. – Ташкент, 1989. – С. 179.

- Федоров, В.Ф. Микроволновое излучение воздушной плазмы, образованной источником длиннопробежного излучения / В.Ф. Федоров // М.: Препринт МИФИ. 038 90, 1990. 20 с.
- 84. Федоров, В.Ф. Микроволновое излучение воздушной плазмы, образованной источником длиннопробежного излучения / В.Ф. Федоров // Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой: тезисы доклада V конференции Ташкент, 1989. С. 166.
- 85. Федоров В.Ф. О гомотермической ударной волне, вызванной действием мгновенного монохроматического излучения/ В.Ф. Федоров // ПМТФ. № 2. 1979. С. 175 - 178.
- 86. Федоров, В.Ф. Радиотепловое излучение тепловой и ударной волн/ В.Ф. Федоров // Физика низкотемпературной плазмы: мат. VIII вс. конф. – Минск, 1991. – С. 148-150.
- Федоров, В.Ф. Микроволновое излучение тепловой и ударной волн / В.Ф. Федоров // Забабахинские научные чтения: сборн. тез. докл. – Челябинск-70, 1991. – С. 140.
- Микроволновое радиометрическое зондирование верхней атмосферы над Нижним Новгородом/ А.А. Красильников [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. –1998. – Т.41. № 11. – С. 1405-1423.
- Вдовин, В.Ф. Малошумящие приемники миллиметровых и субмиллиметровых волн/ В.Ф. Вдовин, И.И. Зинченко // Известия вузов. Радиофизика. – 1998. – Т.41. №11. – С.1424- 1447.
- Красильников, А.А. Компенсационный спектрорадиометр 3 мм диапазона длин волн / А.А. Красильников // Известия вузов. Радиофизика. – 1995. – №6. – С. 608-614.
- 91. Горбачев, Л.П. О микроволновом излучении в процессах электрического взрыва проводников/ Л.П. Горбачев, С.В. Новиков, В.Б. Соколов // ПМТФ. Т.36. № 1. 1995. С. 3-5.

- Волосюк, В.К. Корреляционная связь рассеянного и собственного излучения статистически неровных подстилающих поверхностей/ В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко, В.И. Пономарев // ДАН СССР. – 1991. – Т. 317. – № 6. – С. 1362-1365.
- 93. Волосюк, В.К. Оценка корреляционной связи отраженных сигналов и сигналов собственного излучения статистически неровных поверхностей раздела / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко, В.И. Пономарев // Радиотехника и электроника. 1991. № 7. С. 1238-1246.
- 94 Корреляционная связь радиолокационных и радиотепловых изображений поверхностей / В.К. Волосюк [и др.] // Труды ГосНИИЦИПР. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1986. – № 26. – С. 20-26.
- 95. Volosyuk, V.K. Correlation of scattered radiation and self-radiation from a statistically rough underlying surface / V.K. Volosyuk, V.F. Kravchenko, V.I. Ponomaryov // Doklady Physics. 1991. № 4. P. 297-300
- 96. Volosyuk, V.K. Estimate of correlation of reflected signals and natural radiation signals of statistically rough intergaces / V.K. Volosyuk, V.F. Kravchenko, V.I. Ponomaryov // Journal of Communications Technology & Electronics. 1992. N
 ^o 1. P. 1-7.
- 97. Волосюк, В.К., Кравченко, В.Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации/ Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
- 98. Исследование неоднородностей протяженных сред методом пассивноактивной радиометрии в миллиметровом диапазоне длин волн / С.А. Пелюшенко [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – №10-11. – 2005. – С. 890-898.
- 99. Активно-пассивный радиовизор для медицинской диагностики в 8-мм диапазоне длин волн / А.Г. Кисляков [и др.] // Сборник докладов Международной конференции «Радиоэлектроника в медицинской диагностике». – Москва, 1995. – С. 99.

- 100. Аппаратурный комплекс для измерений отражений и излучения мм радиоволн от биологических объектов и некоторые результаты измерений / А.Г. Кисляков [и др.] // Труды Всесоюзной конференции «Методические вопросы определения температуры биологических объектов радиофизическими методами». – Звенигород, 1983. – С. 53.
- 101. Pelyushenko, S.A. Microwave sensor for detection of anti-infantry mines in subsurface / S.A. Pelyushenko, I.V. Rakut // Proceedins of the SPIE's 11th Annual international Symposium on AeroSpace. – Orlando, Florida, USA, 1997. – Vol.3079. – P.643-651.
- 102. Kislyakov, A.G. 8-mm Radiometer-Reflectometer for Laboratory Remote Sensing Measurements / A.G. Kislyakov, S.A. Pelyushenko, I.V. Rakut // Proc. 21st Annual Conf. Remote Sensing Society (RSS95). – University of Southampton, GB, 1995. – P. 669-676.
- 103. Пелюшенко, С.А. Подповерхностное зондирование пространственно неоднородных сред / С.А. Пелюшенко, И.В. Ракуть, // Труды XX Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». – Нижний Новгород, 2002. – С.386-387.
- 104. Ракуть, И.В. Миллиметровый радиометрический комплекс пассивноактивного ближнего радиовидения и диагностики людей / И.В. Ракуть, С.А. Пелюшенко // Тезисы доклада Всерососсийского научно-технического семинара «Дистанционное обнаружение и диагностика людей с помощью радиолокационных средств». – Москва, 2005.
- 105. Пелюшенко, А.С. Пассивно-активные системы радиовидения миллиметрового диапазона длин волн / А.С. Пелюшенко, И.В. Ракуть, С.А. Пелюшенко // Сборник докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород, 2005. – С. 19-20.
- 106. Бубукин, И.Т. Миллиметровая радиометрия температурной пленки на морской поверхности/ И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. № 4. – С. 261-267.

- 107. Бубукин, И.Т. Измерение отражательной способности и диэлектрической проницаемости воды в пленочном слое морской поверхности в миллиметровом диапазоне / И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. № 7. – С. 660-669.
- 108. Бубукин, И.Т. Дистанционная диагностика пленочного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне / И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. № 10. – С. 1089-1098.
- 109. Бубукин, И.Т. Радиометрия температурной пленки морской поверхности/
 И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Успехи современной радиоэлектроники. –
 2006. № 11. С. 39-55.
- 110. Бубукин, И.Т. Спектральные радиометрические измерения температуры и излучательной способности взволнованной поверхности моря/ И.Т. Бубукин, К.С. Станкевич // Изв. АН, Физика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 42. № 1. – С. 115-125.
- 111. Патент 2437068 Российская Федерация, МПК G01J5/00, G01J5/50, Пирометр: №2010126787/28; заявл. 30.06.2010; опубл. 20.12.2011, / Орлов И.Я., Афанасьев А.В., Никифоров И.А. [и др.].
- 112. Патент 20070047615 A1 US, МПК G01J5/50. Method of measuring in situ differential emissivity and temperature. №US 11/217,884; заявл. 01.09.2005; опубл. 01.03.2007/ М. Twerdochlib
- 113. Патент WO 1999028715 A1 WO, MПК G01J5/58, G01J5/60, G01J5/00. Thermal imaging for semiconductor process monitoring. № PCT/US 1998/025394; заявл. 30.11.1998; опубл. 10.06.1999/ Charpenay S., Cosgrove J.E., Rosenthal P.A., Xu J.
- 114. Оптимизация оценок параметров источника шумового излучения в двухэлементном радиоинтерферометре/ В.К. Волосюк [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2013. –58 (8). – С. 776-788.
- 115. Современные методы оптимальной обработки пространственно-временных сигналов в активных, пассивных и комбинированных активно-пассивных

радиотехнических системах. Обзор / В.К Волосюк [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2014. – 59 (2). – С. 109-131.

- 116. Система ближнего пассивного радиовидения 3-мм диапазона/ В.В. Гладун [и др.]// Журнал радиоэлектроники. – 2010. –. № 7.
- 117. Ашкеназы, В.О. Сплайн-поверхности: Основы теории и вычислительные алгоритмы: Учебное пособие. Тверь: Тверской гос. ун-т, 2003. 82 с.
- 118. Де Бур, К., Практическое руководство по сплайнам: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985. 304 с.
- 119. A European Association for the Control of Structures joint perspective. Recent studies in civil structural control across Europe/ B. Basu [et al.] // Structural Control and Health Monitoring. - v.21. - 2014. - p. 141-167.
- 120. Analog Devices, HMC431LP4 / 431LP4E MMIC VCO w/ buffer amplifier, 5.5 6.1 GHz
- 121. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники кн. 2/ Б.Р. Левин. – М.: Советское радио, 1968. – 504 с.
- 122. Analog Devices, ADL5380 400 MHz to 6 GHz Quadrature Demodulator
- 123. Wilson, I.K. Observation of radome transmission losses at 5 cm wavelength // Prepr. 18 Radar meteo. conf. AMS. – Boston, 1978. – P. 288-291.
- 124. Берюлев, Г.П Некоторые результаты измерений ослабления радиоволн в радиопрозрачном укрытии антенны, покрытом водяной пленкой/ Г.П. Берюлев, Б.П. Колосков, Ю.В. Мельничук // Труды VI Всес. сов. по радиометеорологии. – Л.: ГМИ, 1984. – С. 49-51.
- 125. Фазометрический комплекс КВЧ диапазона ФМК-301 [Электронный ресурс]/ Режим доступа: http://afs52.ru/фазометрический-комплекс-фмк-301.html
- 126. Комплексы фазометрические ФМК-301 М. Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству об утверждении типа средства измерения № 74045.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

Статьи в журналах из перечня ВАК:

- A1. Иконников, В.Н. Реализация радиометрического канала в составе комплекса микроволнового зондирования при наличии постоянных внутрисистемных узкополосных помех/ В.Н. Иконников, В.А. Канаков, Д.В. Савельев // Известия вузов. Радиофизика. - 2017. - Т. 60, № 2. - С. 124. Перевод: Ikonnikov, V.N., Kanakov, V.A., Savelyev, D.V. Realization of a Radiometric Channel as Part of the Microwave Sensing Complex in the Presence of Permanent Intrasystem Narrowband Interference //Radiophysics and Quantum Electronics. - Vol. 60(2). - P. 113-118. DOI 10.1007/s11141-017-9781-3
- А2. Измерение кинематических и тепловых характеристик быстропротекающих газодинамических процессов методом микроволнового зондирования/ Е.В. Ботов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков, [и др.] // Физика горения и взрыва. 2018. №2. с. 112-116.
- А3. Измерение яркостной температуры быстропротекающих газодинамических процессов с помощью КВЧ радиоинтерферометра-радиометра при наличии сигнала активного канала/ Е.В Ботов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 5. С. 432–439. Перевод: Воточ, Е.V., Ikonnikov, V.N., Kanakov, V.A., [et al.] Measurement of the Brightness Temperature of the Fast Gas-Dynamics Processes using the EHF Radiointerferometer Radiometer in the Presence of Active-Channel Signal // Radiophysics and Quantum Electronics. 2018. –Vol. 61(5). p. 382-388. DOI: 10.1007/s11141-018-9899-y
- А4. Иконников, В.Н. Контроль взаимных смещений элементов конструкции зданий и сооружений при помощи радиоинтерферометра/ В.Н. Иконников, В.А. Канаков // Датчики и системы. 2018. № 7 (227). С. 41-47.
- А5. Иконников, В.Н. Метод восстановления двумерного поля температуры фронта быстропротекающего процесса путём аппроксимации результатов

измерения многоканальным радиометром/ В.Н. Иконников, В.А. Канаков, В.В. Пархачёв // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 1. – С. 85– 93. Перевод: Ikonnikov, V.N., Kanakov, V.A. Parkhachev, V.V. A method for retrieving the two-dimensional temperature field of the fast-process front by approximating the measurement results of a multichannel radiometer. //Radiophysics and Quantum Electronics. – Vol. 62(1). – P. 77–84. DOI 10.1007/s11141-019-09955-0

А6. Метод поверки радиометров миллиметрового диапазона длин волн/ В.Н. Иконников, Н.С. Корнев, Н.С. Макарычев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – Т.81, №3. – С.71-75.

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

- A7. Патент 2698523. Российская Федерация. МПК G01К 11/00, G01К 13/02, G01K 15/00, G01R 29/08, G01R 29/26, G01R 35/00. Способ дистанционного определения термодинамической температуры быстропротекающего процесса, развивающегося в радиопрозрачном объекте, устройство для его осуществления, способы калибровки устройства и генератора шума в устройства: №2018144404; составе этого заявл. 14.12.2018; опубл. 28.08.2019/ Иконников В.Н., Канаков В.А., Корнев Н.С. [и др.]
- A8. 2017660751. Российская Свил. Федерация. Свидетельство 0 государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа ДЛЯ обработки результатов измерений яркостной температуры быстропротекающих процессов/ Иконников В.Н., Канаков В.А., Корнев Н.С. [и др.], 25.09.2017.
- А9. Свид. 2018610503. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программный компонент аппаратно-программного комплекса сбора и обработки данных о деформациях элементов конструкций/ Иконников В.Н., 11.01.2018.

Прочие публикации:

- А10. Иконников, В.Н. Разработка методики калибровки радиометрического канала и обработки сигнала КВЧ-интерферометра/ В.Н. Иконников, В.А. Канаков // Труды XIX научной конференции по радиофизике. – Н.Новгород, 2015. – С.123-124.
- А11. Реализация радиометрического канала в КВЧ интерферометре для диагностики быстропротекающих газодинамических процессов / Е.Н. Богданов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков [и др.] // «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Труды Международной конференции XVII Харитоновские тематические научные чтения. – Саров 2015. – С.442-446.
- А12. Иконников, В.Н. Алгоритм калибровки и обработки сигнала активнопассивного комплекса зондирования газодинамических процессов/ В.Н. Иконников// Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика. – Н.Новгород, 2016. – С.128-129.
- А13. Расширение функциональных возможностей КВЧ интерферометра для диагностики быстропротекающих процессов / Е.В. Ботов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков [и др.] // Информационные системы и технологии. ИСТ 2016: Материалы XXII Международной научно-технической конференции. Н.Новгород, 2016. С.55.
- А14. Иконников, В.Н. Схема измерения взаимных перемещений с помощью интерферометра с двумя разнесенными приемо-передающими блоками/
 В.Н. Иконников// Труды XXI научной конференции по радиофизике. Н.Новгород, 2017. С.229-231
- А15. Одновременное измерение параметров движения и тепловых характеристик быстропротекающих процессов радиоинтерферометром-радиометром КВЧ диапазона/ Е.В. Ботов, В.Н. Иконников, Н.С. Корнев [и др.] // Информационные системы и технологии. ИСТ – 2017: Материалы XXIII

Международной научно-технической конференции. – Н.Новгород, 2017. – С.1160-1164

- А16. Обработка радиометрического сигнала быстропротекающего процесса, зарегистрированного КВЧ радиоинтерферометром-радиометром/ Е.В. Ботов, В.Н. Иконников, Н.С. Корнев [и др.] // Будущее технической науки: сборник материалом XVII Международной молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – с.11-12.
- А17. Измерение кинематических и тепловых характеристик быстропротекающих газодинамических процессов с помощью комплекса микроволнового зондирования/ Е.В. Ботов, В.Н. Иконников, В.А. Канаков, [и др.] // «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны». Труды Международной конференции XIX Харитоновские тематические научные чтения. Саров, 2018. Т.2. С.300-302

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ Первый заместитель директора РФЯЦ-ВНИИЭФ – директор филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова», доктор технических наук, профессор А.Ю. Седаков 6. 03 2021r.

AKT

внедрения в филиале РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» результатов диссертационной работы Иконникова Владимира Николаевича «Микроволновое зондирование сложных динамических объектов на малой дальности», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Комиссия в составе председателя – Кашина А.В. и членов комиссии: Назарова А.В., Белова А.С., Орехова Ю.И, Корнева Н.С., назначенная приказом первого заместителя директора РФЯЦ-ВНИИЭФ – директора филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» от 04.03.2021 г. № 195-95/316-п, рассмотрев диссертацию Иконникова В.Н., отмечает:

1. Диссертация посвящена развитию методов микроволновой интерферометрии и радиометрии в приложении к задачам зондирования сложных динамических объектов: измерение термодинамических (температура, яркостная температура) и кинематических (перемещение, скорость) параметров фронтов ударно-волновых и детонационных процессов, а также измерение динамических параметров конструкций в условиях внешних воздействий.

2. В диссертации получены следующие результаты: разработана и реализована в лабораторных условиях калибровки методика радиометрического канала радиоинтерферометра миллиметрового диапазона длин волн с разделением активного и пассивного каналов по форме спектра; разработан алгоритм определения термодинамической температуры объекта на основе измерительных сигналов радиоинтерферометра с радиометрическим каналом, в котором активное и пассивное зондирование производится синхронно в общем частотном диапазоне, сигналы регистрируются общим приемным устройством, разделение активной и пассивной компонент сигнала проводится по форме спектра. Данный алгоритм реализован в программном обеспечении для обработки измерительных сигналов радиоинтерферометра. Представлены результаты газодинамических экспериментов, подтверждающие работоспособность разработанных методик.

3. Полученные автором результаты использовались при выполнении в 2014-2016 гг. ОКР по разработке радиоинтерферометра с радиометрическим каналом ПРИ-03, а также при выполнении в 2017-2020 гг. ОКР по разработке двухчастотного радиоинтерферометра-радиометра РИРМ-03, что позволило повысить достоверность измерения термодинамической температуры газодинамических процессов и реализовать относительную погрешность не более 25 %.

Председатель:

Научный руководитель филиала – заместитель главного конструктора филиала – начальник научно-исследовательского отделения 95-30-33, д.т.н., с.н.с.

Члены комиссии:

Заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела 95-30-3370, к.т.н., доцент

Заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела 95-30-3360, к.ф.-м.н.

Главный научный сотрудник научно-исследовательского отделения 95-30-34, д.т.н., с.н.с.

Начальник научно-исследовательской группы 95-30-3371

А.В. Кашин

А.В. Назаров

А.С. Белов

Ю.И. Орехов

Н.С. Корнев

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» Бокс № 486, г. Нижний Новгород, 603951 Тел. (831) 465-49-90, факс (831) 466-87-52, 466-67-69, E-mail: niiis@niiis.nnov.ru