

На правах рукописи

ФЕДОСЕЕВА ЕЛЕНА ВАЛЕРЬЕВНА

**МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ПОМЕХОВЫХ
ФАКТОРОВ В РАДИОТЕПЛОЛОКАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ
МЕТЕОПАРАМЕТРОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Орел – 2015

Работа выполнена в Муромском институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Научный консультант: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор
Щукин Георгий Георгиевич

Официальные оппоненты: Минлигареев Владимир Тимурович
доктор технических наук, доцент
ФГБУ «Институт прикладной геофизики» им.
Е.К. Федорова, заместитель директора по научной ра-
боте

Лисичкин Владимир Георгиевич
доктор технических наук, доцент
ГКОУ ВПО «Академия федеральной службы охраны
Российской Федерации», доцент кафедры

Кадыгров Евгений Николаевич
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория»,
главный научный сотрудник лаборатории дистанцион-
ного зондирования

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военное обра-
зовательное учреждение высшего профессионального
образования «Военно-космическая академия им.
А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской
Федерации

Защита диссертации состоится «21» апреля 2015г. в 13-00 на заседании диссертацион-
ного совета Д.212.182.01 при ФГБОУ ВПО «Госунiversитет - УНПК» по адресу:
302020, РФ, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29, ауд.212, официальный сайт:
www.gu-unpk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госунiversитет –
УНПК» и на официальном сайте www.gu-unpk.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте Госунiversите-
та – УНПК по адресу: www.gu-unpk.ru

Автореферат разослан « _____ » _____ 2015г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

_____ В.Н. Волков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. СВЧ радиотеплолокационные системы позволяют непрерывно получать информацию об исследуемой области пространства при дистанционном измерении ее собственного радиошумового излучения. Это определяет возможность включения их в контрольно-измерительные комплексы мониторинга состояния окружающей среды. По данным измерений метеопараметров выполняются длительные и срочные метеопрогнозы, формируются предупреждения об опасных метеоявлениях – ливневых дождях, граде, грозовых явлениях, о наличии переохлажденных зон в атмосфере и возможности обледенения самолетов, что позволяет формировать метеопрогнозы для управления метеозависимыми процессами и объектами. Ошибки оценки вероятности указанных метеоявлений зависят от точности выполнения контрольно-измерительных процедур, поэтому вопросы повышения точности измерений в СВЧ радиотеплолокационных системах напрямую связаны с достоверностью информации и безопасностью функционирования метеозависимых объектов.

Основные теоретические и методические положения радиотеплолокационного мониторинга природных сред освещены в работах В.С. Троицкого, С.А. Жевакина, К.С. Шифрина, Н.М. Цейтлина, Р. Дикке, К. Толберта, Д. Стилина, В. Нордберга, А.П. Наумова, Л.Т. Тучкова, В.В. Богородского, К.Я. Кондратьева, А.Е. Башаринова, А.Г. Горелика, Б.Г. Кутузы, Г.Г. Щукина, А.И. Козлова, В.В. Фалина и др. В области разработки СВЧ радиотеплолокационных контрольно-измерительных систем выполнено большое число исследований, как в Российской Федерации, так и за рубежом. Значительный вклад в развитие радиотеплолокационных методов внесли научные коллективы Института радиотехники и электроники РАН, Института космических исследований РАН, Центральной аэрологической обсерватории, Военной инженерно-космической академии им. А.Ф. Можайского, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, Московского физико-технического института (государственного университета), Научно-исследовательского радиофизического института, Московского государственного технического университета гражданской авиации. Исследования в области радиотеплолокационного контроля метеопараметров проводятся в зарубежных научно-исследовательских организациях, крупнейшими из которых являются Radiometrics corporation (Boulder, США), RPG Radiometer Physics (Германия), Institute of Applied Physics University (Bern, Швейцария), Helsinki University of Technology Radio laboratory (Финляндия), Center for Microwave Remote Sensing (Италия) и др.

Системы радиотеплолокационного контроля параметров природных сред, осуществляющие прием и обработку сигналов собственного радиошумового излучения, позволяют получать информацию как об контролируемых объектах (пространственное местоположение и интенсивность излучения), так и среде переноса излучения (оптическая толщина). Например, по данным измерений радиояркостной температуры атмосферы определяются влагозапас атмосферы, водозапас облаков, вертикальные профили температуры и влажности и т.д. На их основе строятся прогнозы по моделям излучения, которые постоянно совершенствуются и уточняются. Точность оценки контролируемого метеопараметра в первую очередь зависит от чувствительности радиометра и наличия помеховых составляющих в составе входного сигнала системы, обусловленных влиянием внешней среды из-за ограниченной селективности антенны и недетерминированных изменений ее характеристик под действием внешних дестабилизирующих факторов.

Известные теоретические положения, на основе которых строятся модели оценки измеряемых радиотеплолокационными системами параметров природных сред, предполагают незначительность влияния внешней среды или возможность оценки и компенсации ее влияния при определенных ограниченных условиях работы СВЧ радиотеплолокационных систем.

Современные достижения в области построения приемной аппаратуры позволили получить чувствительность приемников порядка 0,01 К, в связи с чем возникла необходимость разработки методик учета влияния внешней среды на метрологические характеристики радиотеплолокационных систем контроля и оценки вероятностей ошибок прогноза, обусловленных этим влиянием.

Специфика выполнения контрольно-измерительных процедур в режиме пассивной радиолокации с низким энергопотреблением определяет возможность применения систем радиотеплолокационного контроля в мобильных контрольно-измерительных установках, а также работу в автономном режиме, например, в труднодоступных условиях. Но в этом случае обязательно должно быть учтено или в лучшем случае скомпенсировано влияние внешней среды, особенно при изменяющихся условиях проведения измерений, и поэтому возникает необходимость в априорной оценке достижимых метрологических характеристик при реализации определенного метода компенсации, а также в разработке методов компенсации, максимально снижающих влияние внешней среды независимо от условий функционирования системы.

В этой связи возникает важная *актуальная* научно-техническая задача разработки теоретических основ и прикладных методов компенсации влияния внешней среды в системах радиотеплолокационного контроля метеопараметров, что позволит расширить возможности применения таких систем независимо от внешних условий их функционирования при решении задач выработки прогностических решений для систем управления метеозависимыми процессами и объектами.

Объектом исследования являются методы и системы СВЧ радиотеплолокационного контроля метеопараметров

Предметом исследования являются метрологические характеристики СВЧ радиотеплолокационных систем контроля метеопараметров при помеховом влиянии внешней среды и методы компенсации этого влияния.

Целью диссертационной работы является теоретическое обоснование и практическая разработка методов компенсации влияния внешних помеховых факторов в радиотеплолокационном контроле для повышения точности измерений и расширения функциональных возможностей систем дистанционного контроля метеопараметров.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование принципов радиотеплолокационного контроля метеопараметров при помеховом влиянии внешней среды и разработка способов комплексного учета влияния внешней среды на характеристики систем радиотеплолокационного контроля
2. Построение математических моделей оценки погрешности радиотеплолокационного контроля метеопараметров при учете влияния внешних помеховых факторов.
3. Обоснование применения и исследование методов компенсации влияния внешней среды в системах радиотеплолокационного контроля метеопараметров

4. Разработка методов компенсации аддитивного и мультипликативного помехового действия внешней среды при реализации пространственного разрешения принимаемого сигнала и введения в систему тестового шумового пилот-сигнала.

5. Анализ и разработка методов и аппаратных решений построения радиотеплолокационных контрольно-измерительных систем, обеспечивающих увеличение надежности контроля метеопараметров при недетерминировано изменяющихся помеховых воздействиях внешней среды.

6. Экспериментальная реализация разработанных теоретических решений и оценка эффективности их применения в радиотеплолокационных системах.

Методы исследования. В данной работе использованы методы математического и физического моделирования, аналитический аппарат технической электродинамики, численные методы расчета и анализа, а также методы экспериментального исследования систем радиотеплолокационного контроля.

Научная новизна работы заключается в разработке новых подходов в оценке метрологических параметров систем радиотеплолокационного контроля в условиях сильного помехового влияния внешней среды и методов компенсации этого влияния в радиотеплолокационных системах контроля метеопараметров и включает в себя

- метод оценки влияния внешних помеховых факторов при радиотеплолокационном контроле, базирующийся на положениях радиофизики и радиотеплолокации природных сред, которые лежат в основе комплексных зависимостей измеряемых величин и оцениваемых параметров радиошумового излучения, отличающийся системным учетом внешних помех в работе радиотеплолокационных систем, позволяющий оценить их влияние на метрологические характеристики систем;

- метод оценки погрешности основных способов радиотеплолокационного контроля метеопараметров природных сред, базирующийся на классическом подходе к оценке погрешности косвенных измерений, отличающийся учетом помехового влияния внешних помеховых факторов через коэффициенты влияния и позволяющий априорно оценить погрешности в зависимости от способа и условий проведения радиотеплолокационного контроля;

- метод оценки погрешности компенсации помех в системах радиотеплолокационного контроля, базирующийся на способах оценки влияния окружающего пространства и направленных свойств антенн на результаты измерений, отличающийся учетом параметров антенн и характеристик собственного радиошумового излучения окружающей среды применительно к радиотеплолокационным системам с компенсацией помех и позволяющий априорно оценивать предельные возможности систем с компенсацией помех на основе углового, поляризационного и пространственного разрешения сигнала в системах радиотеплолокационного контроля.

- метод компенсации аддитивного помехового действия внешней среды при пространственном разрешении сигнала, базирующийся на классических методах исключения помеховых воздействий в измерениях (методе вспомогательных измерений и методе модуляции), отличающийся принципом формирования дополнительного сигнала компенсации при реализации двухканального приема, позволяющего решать задачу выделения полезного сигнала независимо от размера, степени однородности и углового положения области исследования.

- метод компенсации мультипликативного помехового действия осадков, базирующийся на классических принципах исключения помеховых воздействий в измерениях - методе вспомогательных измерений, методе модуляции и методе эталонных

сигналов, отличающийся применением тестового пилот-сигнала и принципом пространственного разрешения полезного сигнала, что позволяет одновременно производить компенсацию аддитивного и мультипликативного помехового действия внешней среды.

- способы практической реализации методов компенсации помехового влияния внешней среды, базирующиеся на классических приемах выделения полезного сигнала в приемных устройствах радиотеплолокационных систем, отличающиеся способом осуществления двухканального приема в специально разработанной антенне и способом организации прохождения тестового сигнала, позволяющие скомпенсировать систематические погрешности, обусловленные помеховым воздействием внешней среды.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Предложенный метод компенсации на основе двухканального приема позволяет исключать аддитивное помеховое влияние фонового излучения окружающего пространства на результаты радиотеплолокационного контроля метеопараметров природных сред независимо от размеров контролируемых объектов и наличия радиояркого контраста с прилегающей областью пространства.

2. Разработанный вариант двухканальной двухмодовой антенны с одновременным формированием на раскрыве зеркала двух диаграмм направленности с разделением входных сигналов в специально разработанном модовом разделителе позволяет реализовать предложенный метод компенсации фоновых шумов в двухканальных системах радиотеплолокационного контроля.

3. Полученные результаты численного моделирования и экспериментальных исследований погрешности компенсации фонового шума в двухканальной системе радиотеплолокационного контроля показали возможность обеспечения погрешности компенсации на уровне 10 %, что соответствует принятой погрешности теоретической оценки на основе дополнительных контактных измерений параметров среды и известных моделей излучения, что позволяет рекомендовать ее к применению даже в мобильных комплексах радиотеплолокационного контроля при сложных неоднородных условиях фонового излучения.

4. Предложенный метод компенсации мультипликативного помехового действия метеосадков на результаты радиотеплолокационного контроля позволяет уменьшить погрешность оценки контролируемых метеопараметров, обусловленную формированием слоя осадков на поверхности зеркала антенны радиотеплолокационной системы, обеспечивая возможность проведения радиотеплолокационного контроля в сложных метеорологических условиях.

5. Разработанная система радиотеплолокационного контроля с компенсацией влияния метеосадков на базе двухканальной двухмодовой антенны при реализации невзаимной передачи в основном измерительном канале, позволяет одновременно уменьшить погрешности, обусловленные мультипликативным помеховым влиянием слоя осадков и аддитивным помеховым действием фоновых шумов.

6. Полученные результаты оценки погрешности в разработанной системе радиотеплолокационного контроля в условиях формирования слоя осадков на поверхности антенны показали возможность снижения величины погрешности не менее чем в два раза в зависимости от условий формирования слоя осадков, что позволяет рекомендовать к применению данную систему в сложных метеорологических условиях выпадения осадков.

Реализация результатов работы. Исследования и практические разработки, приведенные в диссертационной работе, являются частью научно-исследовательских работ, выполненных в рамках гранта Президента РФ по поддержке молодых российских учёных и ведущих научных школ Российской Федерации (2004-2005 гг., код НШ-1793.2003.5), а также грантов РФФИ №12-02-97520-р_центр_a (2012-2013 гг.) и № 14-02-97510-р_центр_a (2014-2016).

Результаты анализа помехового влияния окружающего пространства на характеристики радиолокационного приема и разработки антенных систем, обеспечивающих уменьшение этого воздействия за счет снижения бокового излучения, вошли в отчеты по НИР по договору №26/96 с ГГО им. А.И.Воейкова, № 2680/02 с ОАО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», ГБ-358/03 по проекту № 205.05.01.057.

Результаты исследований и их практической отработки были внедрены в Российском гидрометеорологическом государственном университете г. Санкт-Петербург, на ОАО «Муромский завод радиоизмерительных приборов», на ОАО «Научно-производственном предприятии «Радар ммс» и в учебном процессе Муромского института Владимирского государственного университета.

Личный вклад автора. Автору принадлежит основная идея работы, постановка задач исследования и разработанные способы для решения этих задач.

Совместно с соискателями, у которых автор диссертации осуществлял научное руководство, получены данные по реализации методов компенсации фоновых шумов и слоя осадков на поверхности зеркала антенны.

Анализ влияния внешних помеховых воздействий на результаты измерений при радиотеплолокационном контроле метеопараметров природных сред проведен автором с участием научного консультанта.

Использованный в диссертации экспериментальный материал собран лично автором или получен при непосредственном участии автора в ходе выполнения НИР.

В результате анализа и обобщения данных, полученных автором:

- разработана математическая модель влияния фоновых шумов и слоя осадков на поверхности антенны на результаты радиотеплолокационного контроля и проанализировано обусловленное этим влиянием изменение характеристик систем радиотеплолокационного контроля;

- с применением статистических методов получены оценки погрешности радиотеплолокационного контроля при учете вклада фонового шума;

- с применением известных алгоритмов оценки параметров антенны и опубликованных данных о поляризационных свойствах радиошумового излучения природных сред получены оценки погрешности следующих методов компенсации фоновых шумов: диаграммной модуляции, поляризационного разрешения и двухканального приема;

- с помощью теории электродинамики для волн в направляющих системах разработаны модели характеристик двухканальных двухмодовых антенн;

- с помощью предложенной в диссертации методики проведена сравнительная оценка эффективности применения одноканальной и двухканальной систем радиотеплолокационного контроля в условиях действия внешних помех.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью аналитических и численных методов исследования, большим массивом

информационной базы, в качестве которой послужили сведения, опубликованные в периодических научных журналах и научной литературе.

Выполненный теоретический анализ погрешностей измерений при реализации радиотеплолокационного контроля подтверждаются опубликованными данными, а теоретический анализ эффективности методов компенсации - экспериментальными исследованиями

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II и III научные конференции «Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды» (Муром, 1992, 1999); Шестая Всероссийская научно-техническая конференция «Радиоприем и обработка сигналов», посвященная 75-летию Нижегородской радиолоборатории (Нижний Новгород, 1993); Международная научно-техническая конференция «Проблемы радиоэлектроники» (к 100-летию радио) (Москва, 1995); Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем» (Пенза, 1996, 1997, 1998); XVIII и XX Всесоюзные конференции по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 1996, Нижний Новгород, 2002); I и II Всероссийские научные конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами» (Муром, 2001, Санкт-Петербург, 2004); III Всероссийская конференция «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве» (Москва, 2002); I – III Всероссийские научные конференции – семинары «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике» (Муром, 2003, 2006, 2010); Четвертая Всероссийская научная школа и конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред» (Муром, 2009); XXII и XXIII Всероссийские научные конференции «Распространение радиоволн» (Ростов-на-Дону, 2008, Йошкар-Ола, 2011); Всероссийские конференции «Зворыкинские чтения» (Муром, 2009-2012); II и III Всероссийская научная конференция «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (Санкт-Петербург, 2012 - 2014); 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2014); II – IV Всероссийские научные Армандовские чтения (Муром, 2012 – 2014); ежегодные научно-технические конференции Муромского института Владимирского государственного университета (1993 - 2014).

На защиту выносятся совокупность научных положений, теоретических и экспериментальных результатов по разработке компенсационных методов радиотеплолокационного контроля метеопараметров, а именно:

- метод оценки помехового влияния внешней среды на метрологические характеристики систем радиотеплолокационного контроля;
- метод оценки погрешности основных способов радиотеплолокационного контроля метеопараметров в зависимости от условий измерений;
- метод оценки погрешности компенсации в системах радиотеплолокационного контроля с компенсацией помех на основе углового, поляризационного и пространственного разрешения;
- метод компенсации аддитивного помехового действия внешней среды на основе двухканального приема в системах радиотеплолокационного контроля;
- метод компенсации мультипликативного помехового действия осадков и аддитивного помехового действия внешней среды;

– способы практической реализации методов компенсации помехового влияния внешней среды.

Публикация и апробация результатов работы.

По теме диссертации опубликовано 35 статей, 23 из которых в журналах рекомендованных ВАК, а также получены один патент на изобретение, три патента на полезную модель, издана монография. Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на научных Международных и Всероссийских конференциях.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (230 наименований). Общий объем диссертации 346 страниц сквозной нумерации. Диссертация содержит 154 рисунка, 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследований, сформулирована цель работы и основные задачи, показаны практическая значимость и реализация результатов работы, перечислены новые результаты и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены принципы радиотеплолокационного контроля метеопараметров природных сред, приведены основные экспериментальные модели оценки параметров атмосферы – влаго- и водозапаса, показано наличие линейной регрессионной зависимости указанных параметров от радиояркостной температуры контролируемой области атмосферы и сделаны выводы о непосредственной связи погрешности радиояркостного контроля параметров природных сред с точностью измерения радиотеплолокационными системами радиояркостной температуры контролируемой области.

Проанализирована взаимосвязь вероятностных характеристик радиояркостного контроля метеопараметров природных сред и метрологических характеристик радиотеплолокационных систем – точности, чувствительности и пространственной разрешающей способности при измерении радиояркостной температуры.

Во **второй главе** диссертации проанализировано влияние внешних помехообразующих факторов на результаты радиотеплолокационного контроля и предложены методики оценки влияния фоновых помех на метрологические характеристики радиотеплолокационных систем.

В **первом разделе** сформулированы теоретические основы методов компенсации помех в системах радиотеплолокационного контроля, исходя из условий измерений и характера измеряемого сигнала, и показано преимущество двухканального метода исключения влияния внешних помех при невозможности обеспечения требуемой точности измерения при первичной селекции сигнала. Для методологического изложения вопросов компенсации в системах радиотеплолокационного контроля предложены модели входных сигналов с выделением помеховых составляющих: аддитивных, обусловленных приемом фонового излучения, и мультипликативных, возникающих при недетерминированном изменении параметров антенны, например, при образовании на зеркале антенны слоя осадков.

Во **втором разделе** проведен теоретический анализ помехового воздействия фонового излучения на результаты измерений при радиотеплолокационном контроле. В

предложенной методике абсолютная погрешность оценивалась по приросту антенной температуры за счет помеховых составляющих, обусловленных однородным фоновым излучением, наличием дискретных источников радишумового излучения в области рассеяния ДН антенны и изменением состояния подстилающей поверхности.

Показано, что для однородного фонового излучения прирост антенной температуры может оцениваться по известным моделям радиояркой температуры. Оценка прироста антенной температуры, обусловленного наличием дискретных источников и изменением состояния подстилающей поверхности, усложняется случайным характером их появления.

В третьем разделе проанализировано влияние слоя осадков на поверхности антенны на результаты радиотеплолокационного контроля.

Анализ показал, что величина прироста входного сигнала радиометра - антенной температуры, обусловленного слоем осадков на поверхности антенны, зависит от толщины слоя осадков и от соотношения термодинамической температуры антенны и усредненной радиояркой температуры исследуемой области. Полученные зависимости прироста антенной температуры от интенсивности дождя приведены на рис.1 для частот 13,6 ГГц (а) и 31,6 ГГц (б).

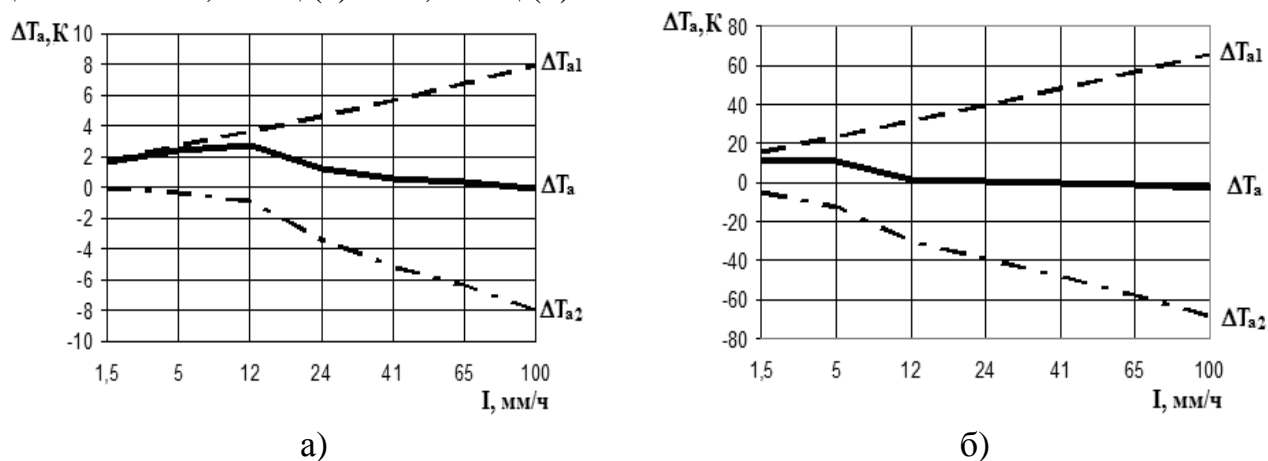


Рис.1 Зависимости прироста антенной температуры от интенсивности дождя

$$\Delta T_{a1} = \bar{T}_{\Sigma 321}, \Delta T_{a2} = T_a (R_{321}^2 - 1)$$

Впервые показано наличие положительного прироста антенной температуры – погрешности измерений при малых интенсивностях дождя, величина которой увеличивается с ростом частоты.

В четвертом разделе анализируется влияние фонового шума на характеристики систем радиотеплолокационного контроля – отношение сигнал-шум, чувствительность, точность измерений и пространственное разрешение.

Для оценки влияния фонового шума на характеристики оценки неоднородностей в контролируемой области введено отношение сигнал-шум на входе системы

$$q_{\text{сист}} = \frac{q_{\text{пр}} q_a}{q_{\text{пр}} + q_a}, \quad (1)$$

где $q_{\text{пр}}$ – отношение сигнал-шум, определяемое по шумам приемника; q_a – отношение сигнал-шум, определяемое по помеховой составляющей входного сигнала - антенной температуры.

Получено, что при условии $q_{\text{пр}} = 1$ (пороговое значение, соответствующее принятию решения об обнаружении контролируемого объекта) значимое влияние на от-

ношение сигнал-шум $q_{\text{сист}}$ оказывает величина q_a , значение которой $q_a \in [0;10]$, что соответствует радиотеплолокационному контролю в условиях высокого уровня фонового шума по отношению к низкотемпературным контролируемым метеобъектам в системах с малой направленностью антенны.

Чувствительность радиотеплолокационной системы с учетом помеховых составляющих входного сигнала предложено определять по выражению

$$\Delta T = \mu \delta T_0 (1 + q_{\text{пр}} (1 + 1/q_a))^{-1}. \quad (2)$$

где δT_0 – потенциальная чувствительность системы, задаваемая только шумами радиометра; μ – коэффициент, зависящий от схемного построения радиометра; T_0 – термодинамическая температура системы.

Для оценки влияния помеховых составляющих входного сигнала был введен относительный коэффициент снижения чувствительности Δq

$$\Delta q = 1 + q_{\text{пр}} (1 + 1/q_a). \quad (3)$$

Численная оценка Δq показала, что изменение чувствительности достигает единиц процентов при контроле параметров высокотемпературных метеобъектов системами с низкими собственными шумами.

Общая относительная погрешность при радиотеплолокационном контроле рассматривалась как сумма среднеквадратических погрешностей измерений параметров и характеристик системы

$$\delta_{T_{\text{гл}}}^2 \approx K_{T_a}^2 \delta_{T_a}^2 + K_{T_\phi}^2 \delta_{T_\phi}^2 + K_{T_0}^2 \delta_{T_0}^2 + K_\beta^2 \delta_\beta^2 + K_\eta^2 \delta_\eta^2, \quad (4)$$

где δ_{T_ϕ} – относительная погрешность измерения радиояркостной температуры, обусловленная наличием в антенной температуре составляющей, обусловленной приемом фонового шума, равная $\delta_{T_\phi} = T_\phi / T_{\text{гл}}$.

Для возможности оценки влияния уровня фонового шума принято упрощающее соотношение $\bar{T}_\phi = \alpha \bar{T}_{\text{гл}}$, при этом коэффициенты влияния равны

$$K_{T_a} = \frac{1}{(1-b)h} \left((1-(1-a)b)h + \frac{T_0}{\bar{T}_{\text{гл}}} (1-h) \right), \quad K_{T_\phi} = \frac{b}{(1-b)}, \quad K_{T_0} = \frac{(1-h)T_0}{(1-b)h\bar{T}_{\text{гл}}}, \quad K_b = \frac{b(1-a)}{(1-b)h},$$

$$K_h = \frac{T_0}{(1-b)\bar{T}_{\text{гл}}} - \frac{1-(1-a)b}{(1-b)}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены зависимости доли общей погрешности измерений при радиотеплолокационном контроле, обусловленной фоновым шумом.

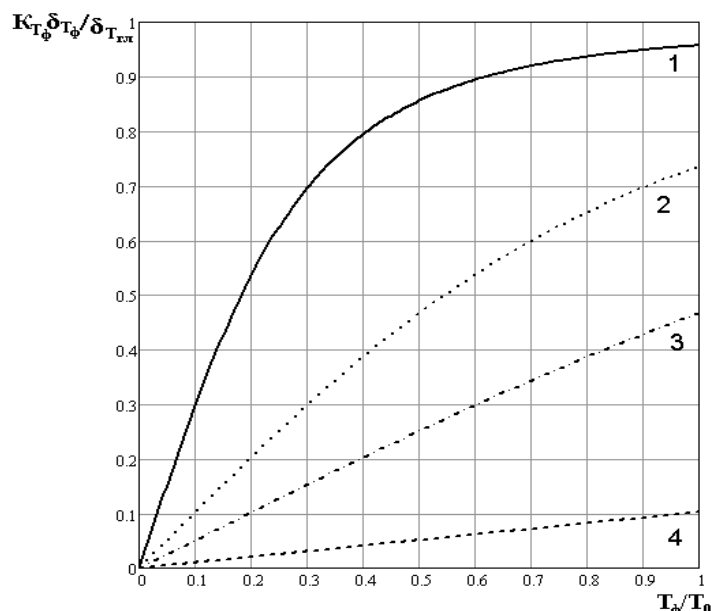


Рис.2 Зависимость доли общей погрешности измерений при радиотеплолокационном контроле, обусловленной фоновым шумом, при коэффициенте рассеяния антенны $b = 0,3$ (1), $b = 0,1$ (2), $b = 0,05$ (3), $b = 0,01$ (4), $h = 0,85$, $T_0 = 293\text{K}$, $d_h = 0,1$, $d_{T_a} = 0,1$, $d_{T_0} = 0,01$, $d_b = 0,1$

Полученные результаты показали, что влиянием фонового шума при радиотеплолокационном контроле можно пренебречь в случае высокой направленности антенны и низкого уровня фонового шума, в остальных случаях погрешность измерения, вносимая фоновым шумом, может оказаться преобладающей, что может привести к принятию ложного решения.

Потенциальная угловая разрешающая способность системы радиотеплолокационного контроля при отсутствии фонового шума оценивается в первом приближении шириной главного лепестка ДН антенны. Наличие в составе антенны температуры составляющей, обусловленной фоновым шумом, приводит к снижению угловой разрешающей способности. Проведенная оценка показала, что при радиояростной температуре фонового излучения, в два раза превышающей радиояростную температуру исследуемой области, угловая разрешающая способность снижается на 20%.

Полученные методики оценки влияния внешних помех на метрологические характеристики систем радиотеплолокационного контроля позволили выделить условия, при которых необходима компенсация этого помехового действия.

В **третьей главе** диссертации разработан метод оценки погрешности в основных способах радиотеплолокационного контроля метеопараметров с учетом влияния фоновых шумов.

В **первом разделе** разработана методика оценки погрешности для абсолютного метода контроля метеопараметров горизонтально однородных сред с выполнением дополнительных процедур оценки уровня фонового шума.

Погрешность абсолютного метода в радиотеплолокационном контроле при выполнении внутренней и внешней калибровки системы, при наличии фонового шума с радиояростной температурой $\bar{T}_\phi = \alpha \bar{T}_{гг}$ предложено определять выражением

$$d_{T_{2\lambda}}^2 \approx K_{T_{як}}^2 d_{T_{як}}^2 + K_{T_\phi}^2 d_{T_\phi}^2 + K_{T_0}^2 d_{T_0}^2 + K_b^2 d_b^2 + K_T^2 d_T^2, \quad (6)$$

где $\delta_T = \sigma_T / T_{ак}$, σ_T - чувствительность радиометра.

$$K_{T_0} = \frac{T_0}{(1-b)\bar{T}_{\text{эл}}} \left(\frac{\bar{T}_{\text{эл}}}{T_0} - \frac{T_{\text{як}}}{T_0} \right) (1-(1-a)b), \quad K_{T_{\text{як}}} = \frac{\frac{T_0}{\bar{T}_{\text{эл}}} - (1-(1-a)b)}{(1-b) \left[\frac{T_0}{T_{\text{як}}} - (1-(1-a)b) \right]},$$

$$K_T = \frac{\sqrt{2} \frac{T_0}{\bar{T}_{\text{эл}}} \left[h(1-(1-a)b) + \frac{T_0}{T_{\text{як}}} (1-h) \right] \left[1 - \frac{\bar{T}_{\text{эл}}}{T_0} (1-h) \right]}{(1-b) T_0 / T_{\text{як}}} \times$$

$$\times \left\{ 2 + \frac{\frac{T_0}{T_{\text{як}}} \left[h(1-(1-a)b) + \frac{T_0}{T_{\text{як}}} (1-h) \right]}{\left(\frac{T_0}{T_{\text{як}}} h - h(1-(1-a)b) \right)^2} + \frac{\frac{T_0}{\bar{T}_{\text{эл}}} \left[h(1-(1-a)b) + \frac{T_0}{\bar{T}_{\text{эл}}} (1-h) \right]}{\left(\frac{T_0}{\bar{T}_{\text{эл}}} h - h(1-(1-a)b) \right)^2} \right\}. \quad (7)$$

На рис. 3 приведены зависимости относительной среднеквадратической погрешности и ее составляющих при радиотеплолокационном контроле высокотемпературных (а) и низкотемпературных (б) областей атмосферы при чувствительности радиометра $s_T = 0,1K$.

Получено, что при высокой чувствительности радиометра относительный вклад погрешности оценки фонового шума оказывается определяющим и общая погрешность возрастает по величине при увеличении коэффициента α . Так в среднем увеличение α на 10 % приводит к увеличению погрешность на 1 %.

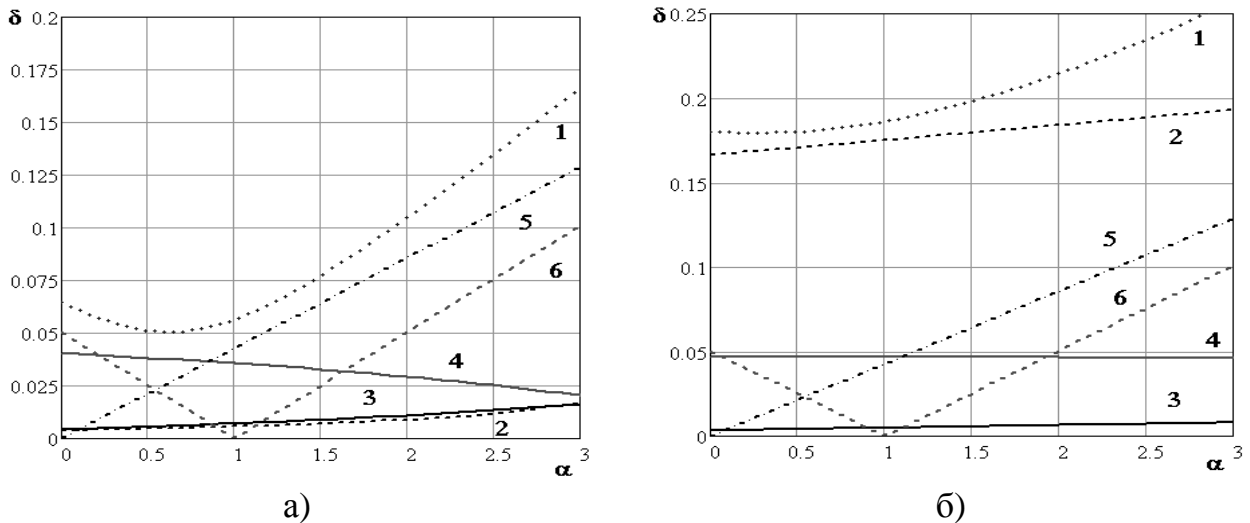


Рис. 3 Зависимость относительной среднеквадратической погрешности абсолютного метода от уровня фонового шума, задаваемого коэффициентом α ($\bar{T}_{\phi} = \alpha \bar{T}_{\text{гл}}$) 1 – $\delta_{T_{\text{гл}}}$; 2 – $K_T \delta_T$; 3 – $K_{T_0} \delta_{T_0}$; 4 – $K_{T_{\text{ак}}} \delta_{T_{\text{ак}}}$; 5 – $K_{T_{\phi}} \delta_{T_{\phi}}$; 6 – $K_{\beta} \delta_{\beta}$

Во втором разделе разработан метод оценки погрешности относительного метода радиотеплолокационного контроля локальных неоднородностей по величине радиояркого контраста с окружающим фоном. При наличии погрешности компенсации фонового шума ΔT_{ϕ} прирост входного сигнала - антенной температуры для радиояркого контраста $\Delta T_{\text{гл}}$ определялся по введенному выражению

$$\Delta T_a = \Delta T_{\text{гл}} (1-\beta)\eta + \Delta T_{\phi} \beta \eta. \quad (8)$$

Тогда для относительной среднеквадратической погрешности оценки радиояркого контраста была предложена формула

$$\delta_{\Delta T_{\text{гл}}}^2 = K_{\beta}^2 \delta_{\beta}^2 + K_{\Delta T_{\phi}}^2 \delta_{\Delta T_{\phi}}^2 + K_{T_0}^2 \delta_{T_0}^2 + K_{T_{\text{як}}}^2 \delta_{T_{\text{як}}}^2 + K_T^2 \delta_T^2, \quad (9)$$

где $\delta_{\Delta T_{\phi}}$ – относительная погрешность измерения, вызванная неточностью компенсации фонового шума, равная $\delta_{\Delta T_{\phi}} = \Delta T_{\phi} / \Delta T_{\text{я}}$;

$$K_{\beta} = \frac{(\Delta T_{\text{я}} - \Delta T_{\phi}) \beta}{(1 - \beta) \Delta T_{\text{я}}}, \quad K_{\Delta T_{\phi}} = \frac{\beta}{(1 - \beta)}, \quad K_{T_0} = \frac{T_0}{T_0 - T_{\text{як}}}, \quad K_{T_{\text{як}}} = \frac{T_{\text{як}}}{T_0 - T_{\text{як}}},$$

$$K_T = T_{\text{ак}} \left[\frac{3}{T_0^2} + \frac{T_{\text{ак}}^2}{T_0^2 (T_0 - T_{\text{ак}})^2} + \frac{2}{\Delta T_{\text{гл}}^2 (1 - \beta)^2 \eta^2} + \frac{1}{(T_0 - T_{\text{ак}})^2} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

На рис. 4 показаны зависимости среднеквадратической погрешности относительного метода контроля по радиояркостному контрасту от его абсолютного значения.

При наличии погрешности компенсации фонового шума общая погрешность существенно возрастает, особенно при небольших значениях $\Delta T_{\text{гл}}$, так при чувствительности радиометра 1 К для радиояркостного контраста $\Delta T_{\text{эл}} = 10 \text{ К}$ погрешность относительного метода при погрешности компенсации фонового шума $\Delta T_{\phi} = 0 \text{ К}$, 10 К и 20 К равна соответственно 0,21, 0,325, 0,542, а при чувствительности радиометра 0,1 К, значения аналогичных погрешностей – 0,034, 0,251, 0,501.

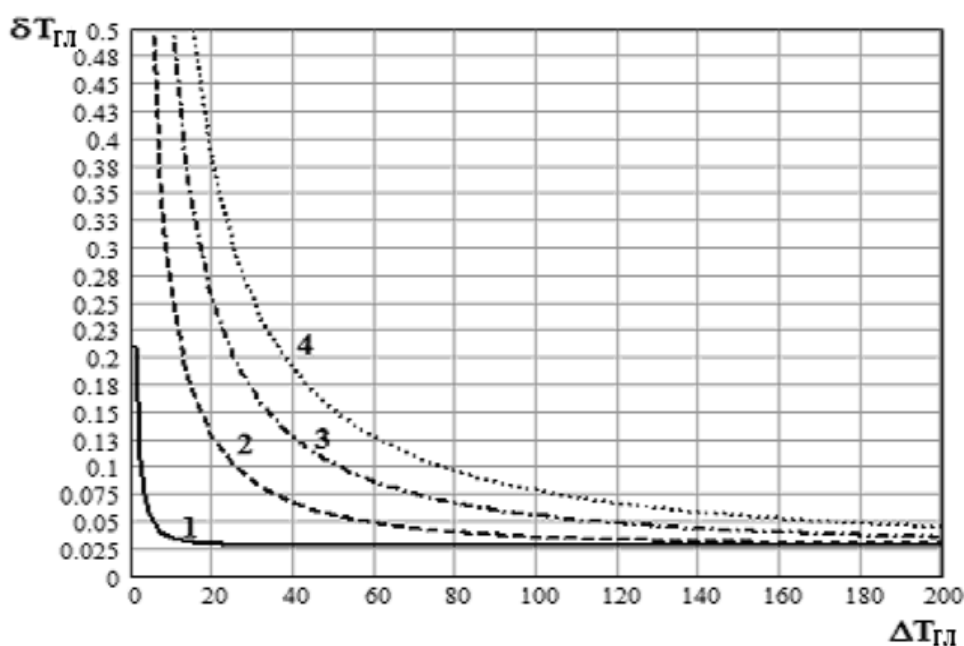


Рис. 4 Зависимость среднеквадратической погрешности относительного метода контроля по радиояркостному контрасту от его абсолютного значения при погрешности компенсации фонового шума ΔT_{ϕ} 0 К (1), 10 К (2), 20 К (3), 30 К (4) ($s_T = 0,1 \text{ К}$)

В третьем разделе разработан метод оценки погрешности метода угловых разрезов при радиотеплолокационном контроле метеопараметров природных сред по результатам отношений радиояркостных температур для двух угловых направлений.

Показано, что в случае расположения опорной области в одном полупространстве с исследуемой областью и оценке параметров по отношению радиояркостных контрастов относительная погрешность для каждого углового направления определяется по выражению (10).

При расположении опорной и исследуемой области в разных полупространствах погрешность из-за разницы фонового шума при направлении на опорную и исследуемую область в первом приближении можно определить по выражению

$$\Delta T_{\phi} = (b_e - b_n)(\bar{T}_{\phi}^e - \bar{T}_{\phi}^n)/(1 - b) = \Delta b \Delta \bar{T}_{\phi_{\text{фон}}} / (1 - b), \quad (11)$$

где b_e , b_n – доли общего коэффициента рассеяния антенны, характеризующие прием через область рассеяния ДН антенны из верхнего и нижнего полупространства соответственно; $\Delta b = b_e - b_n$.

Для оценки коэффициентов влияния погрешностей измерения коэффициента рассеяния антенны и разности фонового шума соответственно получены следующие выражения:

$$K_b = \frac{(\Delta T_{\phi} - \Delta b \Delta T_{\phi_{\text{фон}}})b}{(1 - b)\Delta T_{\phi}} \approx \frac{(1 - \Delta b)b}{(1 - b)}, \quad K_{\Delta T_{\phi}} = \frac{\Delta b}{(1 - b)}. \quad (12)$$

Исследования показали, что с увеличением коэффициента рассеяния β суммарная погрешность радиотеплолокационного контроля уменьшается, что объясняется меньшей абсолютной величиной разности фонового шума для направлений на опорную и исследуемую область. При высокой чувствительности радиометра погрешность практически полностью определяется влиянием разности фонового шума по двум угловым направлениям. Так при $\Delta b / (1 - b) = 0,11$ доля погрешности за счет разности фонового шума равна 73 %, а при $\Delta b / (1 - b) = 0,2$ – 80 %.

В четвертом разделе проанализированы величины погрешности измерения радиояркостной температуры при радиотеплолокационном контроле метеопараметров.

При контроле параметров однородной атмосферы (безоблачной или при наличии слоистообразных облаков) абсолютным методом в частотном диапазоне от 0,2 см до 3 см доля погрешности, обусловленная фоновым шумом, составляет порядка 20 % от общей погрешности измерения при чувствительности радиометра 1 К и 70 % при чувствительности 0,01 К, а при переходе к «квазиулевым» измерениям эти величины достигают 90 %.

При контроле метеопараметров облачной атмосферы по данным измерений радиояркостных контрастов конвективных облаков общая погрешность измерения составляет 3 – 5 % и при чувствительности радиометра 0,1 К практически полностью определяется точностью компенсации фонового шума. Так при погрешности компенсации фонового шума порядка 5 К погрешность измерения радиояркостного контраста величиной 20 К возрастает в 2 раза и составит 6 %, а для контраста в 10 К наблюдается увеличение погрешности в 3 раза и составляет 12 %.

При контроле метеопараметров по данным измерений оптической толщины атмосферы методом угловых разрезов и оптической толщины конвективных облаков методом азимутальных разрезов доля погрешности, обусловленная фоновым шумом, при высокой чувствительности радиометра достигает 95 %.

Таким образом, при высоком уровне чувствительности радиоприемной аппаратуры погрешность радиотеплолокационного контроля метеопараметров в сильной степени зависит от влияния фонового шума.

В четвертой главе диссертации проанализированы методы компенсации помех в радиотеплолокационном контроле при организации двухканального приема с реализацией угловой и поляризационной селекции сигнала компенсации.

В первом разделе проанализирован статистический метод компенсации с оценкой фонового шума, предусматривающий целый комплекс контактных измерений и

последующее применение моделей ради шумового излучения природных сред. Показано, что данный метод обеспечивает при однородных свойствах окружающей среды погрешность оценки фонового шума на уровне 10 %. Кроме того, выявлена его чувствительность к появлению пространственно ограниченной неоднородности на общем однородном фоне, и к изменению состояния среды в одном из полупространств, например, при выпадении осадков.

Во втором разделе проанализированы ограничения по применению метода диаграммной модуляции для компенсации помех в радиотеплолокационном контроле метеопараметров природных сред.

В методе диаграммной модуляции для абсолютной величины погрешности компенсации помеховой составляющей входного сигнала предложено выражение

$$\Delta T = T_{a1}(\theta_1) - T_{a2}(\theta_2) = (T_{\phi_в}(q_1) - T_{\phi_в}(q_2))b_в + (T_{\phi_н}(q_1) - T_{\phi_н}(q_2))b_н + \sum_i (T_{уст_i}(q_1)b_i(q_1) - T_{уст_i}(q_2)b_i(q_2)), \quad (13)$$

где q_1 и q_2 – угловые направления на контролируемый объект и на свободное от объекта пространство; $T_{\phi_в}$ и $T_{\phi_н}$ – радиояркая температура верхнего и нижнего полупространства, $T_{уст_i}$ – радиояркая температура областей пространства с существенным радиоярким контрастом по отношению в однородному окружающему фону; β_i – коэффициент рассеяния области пространства с радиоярким контрастом по отношению к окружающему однородному фону.

Для оценки нижнего предела погрешности компенсации влияния фонового шума методом диаграммной модуляции анализировался случай однородного фонового излучения в верхнем и нижнем полупространствах с учетом относительного перераспределения ДН в области рассеяния (рис. 5).

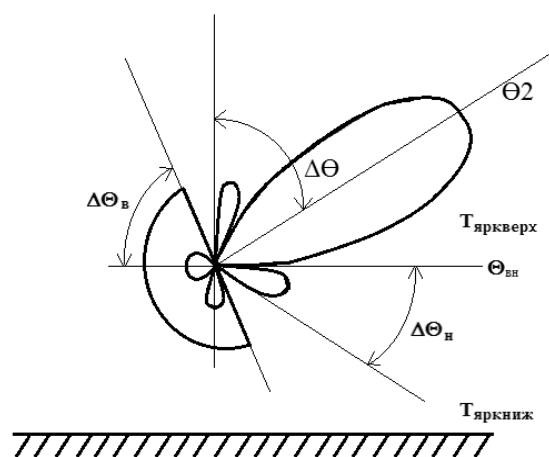


Рис.5 Схема формирования сигнала компенсации в методе диаграммной модуляции

Величина погрешности компенсации фонового шума оценивалась по введенному выражению

$$\Delta = \Delta_{Pq_в} (T_{яркверх} - T_{яркниж}) + \Delta_{Pq_н} (T_{яркниж} - T_{яркверх}) = \Delta_{Pq} \Delta T_{вн}, \quad (14)$$

где $\Delta_{Pq_в}$ и $\Delta_{Pq_н}$ – относительная величина суммарной мощности, принимаемая по угловым секторам $\Delta q_н$ и $\Delta q_в$, соответственно; $\Delta T_{вн}$ – разность радиоярких температур фонового излучения верхнего и нижнего полупространств.

Результаты численного моделирования показали, что даже при упрощенной оценке погрешности компенсации фонового шума как величины прироста пропорцио-

нальной ширине углового сектора неизотропной части области рассеяния ДН, по которому принимается фоновый шум из нижнего по отношению к зеркалу пространству, не учитывая угловой зависимости уровня фонового излучения, значение погрешности компенсации может достигать 5 К, что значительно превышает чувствительность радиометра.

В третьем разделе проанализированы погрешности радиотеплолокационного контроля с компенсацией влияния фонового шума на основе поляризационного разрешения, т.е. при выполнении приема на ортогональной поляризации для формирования сигнала компенсации, адекватного уровню помеховой составляющей основного сигнала. Показано, что ее величина определяется следующими факторами: степенью адекватности условий приема фонового излучения на двух ортогональных поляризациях; величиной развязки по измеряемому сигналу на двух поляризациях; степенью адекватности фонового излучения на двух поляризациях.

Погрешность компенсации фонового шума, обусловленная неадекватностью условий приема антенны на двух ортогональных поляризациях, оценивалась по введенному выражению

$$\Delta T_{\phi} = T_{\phi} (b_{\text{верхЗА}}^z - b_{\text{нижОБ}}^e k_S) = T_{\phi} \Delta b, \quad (15)$$

где $b_{\text{верхЗА}}$ – коэффициент рассеяния монополяризованной зеркальной антенны в область рассеяния ДН в верхнем полупространстве; $b_{\text{нижОБ}}$ – коэффициент рассеяния облучателя зеркальной антенны в область рассеяния ДН в верхнем полупространстве; k_S – коэффициент соотношения эффективных площадей зеркальной антенны и ее облучателя, равный $k_S = S_{\text{ЗА}} / S_{\text{ОБ}}$.

Полученные данные показали, что при условии низкотемпературного фона в верхнем полупространстве, например, при исследовании атмосферы с поверхности земли величина погрешности имеет значение в пределах 2 К, а в случае наблюдения объекта или области пространства при высокотемпературном фоновом излучении, например, контроль параметров атмосферы с борта летающего аппарата, погрешность измерения может оказаться достаточно большой до 10 К.

Развязка на ортогональных поляризациях оценивалась коэффициентом прохождения поверхности антенны. Так на волне $\lambda=3,2$ см его величина равна -25 дБ, и при $T_0=300$ К дополнительные шумы антенны составляют около 1 К, что сравнимо с шумами сплошного металлического зеркала: $T_{\text{ш}} \cong 0.9$ К.

Погрешность, обусловленная разницей в интенсивности фонового излучения на двух ортогональных поляризациях, принималась равной

$$\Delta T = \Delta T_{\text{ниж}} + \Delta T_{\text{верх}}, \quad (16)$$

где $\Delta T_{\text{ниж}}$ и $\Delta T_{\text{верх}}$ – погрешности, обусловленные различием радиояркостных температур на ортогональных поляризациях в верхнем и нижнем полупространствах

$$\Delta T_{\text{ниж}} = \beta_{\text{нижЗА}} (T_{\text{фниж}}^{\Gamma} - T_{\text{фниж}}^{\text{В}}), \quad (17)$$

$$\Delta T_{\text{верх}} = \beta_{\text{верхЗА}} (T_{\text{фверх}}^{\Gamma} - T_{\text{фверх}}^{\text{В}} k_{\beta S}), \quad (18)$$

$k_{\beta S} = \beta_{\text{нижОБ}} k_S / \beta_{\text{нижЗА}}$ – коэффициент, характеризующий различие условий приема по верхней части области рассеяния ДН антенны на двух ортогональных поляризациях.

Более высокая точность обеспечивается при наземном расположении системы. Так при контроле параметров атмосферы при наличии в области рассеяния ДН дождевых облаков с радиояркостной температурой от 100 К до 150 К при $b_{\text{верх}} = 0,035 - 0,04$

прирост антенной температуры $\Delta T_{\text{верх}}$ оказывается равным от 3,5 К до 6 К, а $\Delta T_{\text{ниж}}$ в пределах 3К, а при контроле параметров поверхности земли эти величины равны $\Delta T_{\text{верх}}=10$ К, а $\Delta T_{\text{ниж}}=0,2$ К.

В четвертом разделе проанализирован метод компенсации фонового шума при контроле метеопараметров при переходе к двухканальному приему в антенне, дополнительный канал которой имеет малую пространственную избирательность, например, рупор, находящийся за пределами области формирования ДН зеркальной антенны.

Для численной оценки эффективности компенсации фонового шума были введены следующие величины:

- относительный уровень мощности полезной составляющей в выходном сигнале системы

$$\Delta p1 = p_{\text{осн}}(q_{\text{осн}0}) - p_{\text{доп}}(q_{\text{осн}0}) \left(\frac{R_{\text{осн}}}{R_{\text{доп}}} \right)^2, \quad (19)$$

где $p_{\text{осн}}(q_{\text{осн}0})$ и $p_{\text{доп}}(q_{\text{осн}0})$ - относительные уровни мощности, принимаемые основной и дополнительной антеннами из области главного лепестка ДН основной антенны; $R_{\text{осн}}$ и $R_{\text{доп}}$ - размеры апертур антенн;

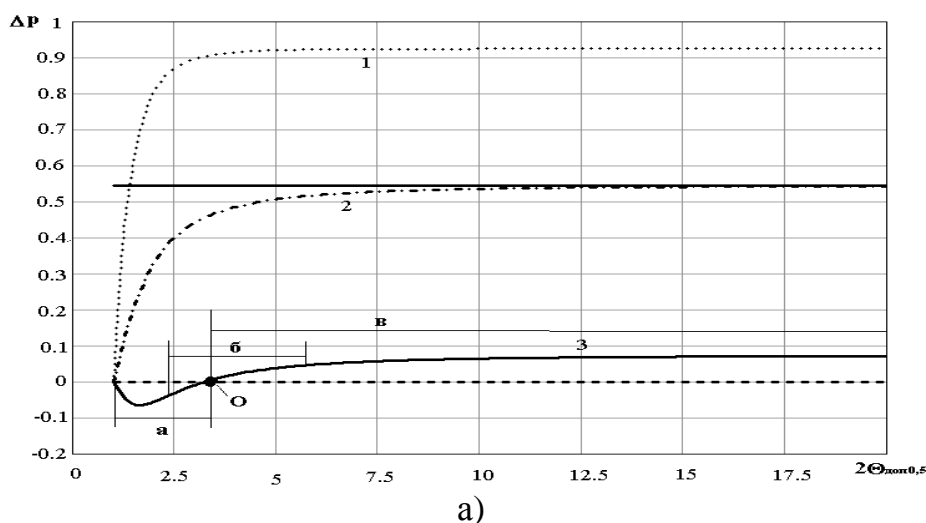
- относительный уровень мощности полезной составляющей в выходном сигнале системы, принимаемой по главному лепестку ДН на уровне половинной мощности $q_{\text{осн}0.5}$,

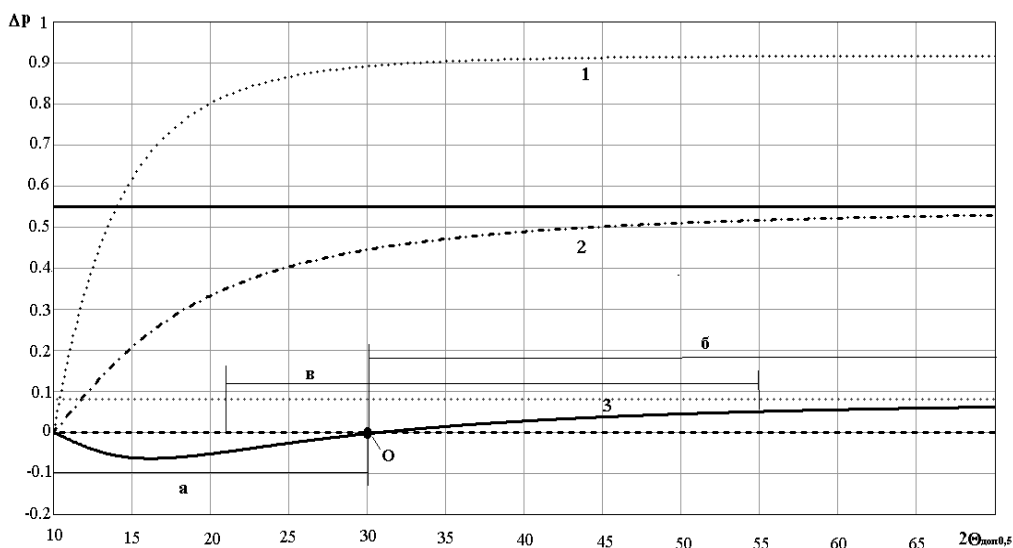
$$\Delta p2 = p_{\text{осн}}(q_{\text{осн}0.5}) - p_{\text{доп}}(q_{\text{осн}0.5}) \left(\frac{R_{\text{осн}}}{R_{\text{доп}}} \right)^2, \quad (20)$$

- относительный уровень мощности помеховой составляющей в выходном сигнале системы

$$\Delta p3 = (1 - p_{\text{осн}}(q_{\text{осн}0})) - (1 - p_{\text{доп}}(q_{\text{осн}0})) \left(\frac{R_{\text{осн}}}{R_{\text{доп}}} \right)^2. \quad (21)$$

На рис. 6 приведены зависимости величин $\Delta p1$, $\Delta p2$, $\Delta p3$ от ширины главного лепестка ДН дополнительной антенны $2\Theta_{\text{доп}0.5}$ при условии, что антенна основного канала имеет ширину главного лепестка ДН $\Delta q_{0.5} = 1^\circ$ (а) и $\Delta q_{0.5} = 10^\circ$ (б).





б)

Рис. 6 Зависимость величин Δp_1 , Δp_2 , Δp_3 от ширины главного лепестка ДН дополнительной антенны $2\Theta_{\text{доп}0,5}$

На рис. обозначено: а – область компенсации фоновых шумов с избытком; б – область компенсации фоновых шумов с недостатком; в – область уменьшения влияния фонового шума при проведении процедуры компенсации; точка О - полная компенсации влияния фонового шума.

Полученные данные показали наличие ограничений на применение слабонаправленных антенн в качестве дополнительных антенн формирования сигнала компенсации без дополнительной регулировки уровня сигнала компенсации в случае основной антенны с высокой направленностью приема излучения.

Таким образом, рассмотренные двухканальные методы компенсации имеют определенные ограничения на условия проведения радиотеплолокационного контроля метеопараметров.

В пятой главе диссертации разработан компенсационный метод исключения влияния аддитивных внутренних и внешних фоновых шумов в радиотеплолокационном контроле при реализации двухканального приема со специальной формой пространственной селекции приема по дополнительному каналу и принципы его аппаратной реализации.

В первом разделе проанализированы известные способы выделения полезного сигнала в приемниках систем радиотеплолокационного контроля - компенсационный, модуляционный и корреляционный и рассмотрены возможности их применения в двухканальной радиотеплолокационной системе с компенсацией фоновых шумов. Показано, что компенсационный принцип может быть использован при периодически проводимой корректировке выходного сигнала по уровню выходного сигнала дополнительного антенного канала. Модуляционный принцип позволяет осуществлять непрерывную компенсацию внутренних и внешних помех. Для применения корреляционного принципа необходимо решение вопроса широкополосной фазировки входных сигналов двух каналов системы.

Во втором разделе разработаны теоретические основы и предложен способ реализации метода компенсации фоновых шумов в двухканальной системе радиотеплолокационного контроля на основе модуляционного радиометра с двухканальной антенной со специальной формой ДН дополнительного антенного канала (рис. 7).

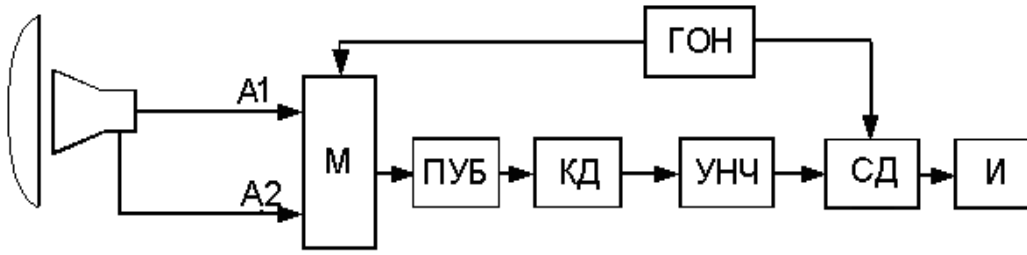


Рис. 7 Функциональная схема двухканальной радиотеплолокационной системы с компенсацией фоновых шумов

Два входных сигнала - основного антенного канала A_1 и дополнительного канала A_2 , в два полупериода управляющего сигнала генератора опорных напряжений (ГОН) проходят общий приемный тракт с преобразованием частоты в приемно-усилительном блоке (ПУБ), амплитудным детектированием в квадратичном детекторе (КД) и усилением в усилителе низкой частоты УНЧ. При этом формируются в соответствующие полупериоды выходные сигналы пропорциональные величинам радиотепловых температур $T_{a1} + T_{шпр}$ и $T_{a2} + T_{шпр}$, где $T_{шпр}$ - шумовая температура приемного тракта радиометра. При отсутствии приема сигнала дополнительной антенной из области главного лепестка ДН основной антенны и при абсолютной адекватности условий приема по области рассеяния двух каналов выходные напряжения УНЧ равны:

- в первый полупериод управляющего сигнала

$$U_{выхA1} \sim kT_{a1} + T_{шпр} = k(T_{эл}(1-b)h + T_{бок}bh + T_0(1-h)) + T_{шпр}, \quad (22)$$

- во второй полупериод управляющего сигнала

$$U_{выхA2} \sim kT_{a2} + T_{шпр} = k(T_{бок}bh + T_0(1-h)) + T_{шпр}, \quad (23)$$

а выходное напряжение синхронного детектора СД определяется выражением

$$U_{выхСД} = U_{выхA1} - U_{выхA2} \sim kT_{эл}(1-b)h, \quad (24)$$

где k - коэффициент передачи радиометра входных сигналов антенны.

Согласно выражению (24) при абсолютном выполнении требований к направленным свойствам дополнительного антенного канала в выходном сигнале радиотеплолокационной системы отсутствуют составляющие, обусловленные влиянием внешнего фонового излучения.

Для характеристики соответствия реальных двухканальных антенн требованиям алгоритма компенсации фоновых помех в системах радиотеплолокационного контроля были введены

1) параметр, характеризующий величину потерь полезного сигнала

$$\Delta_{гл} = \int_0^{\theta_{гл}} |F_{доп}(\theta)|^2 \sin \theta d\theta / \int_0^{\theta_{гл}} |F_{осн}(\theta)|^2 \sin \theta d\theta; \quad (25)$$

2) параметр, характеризующий точность компенсации влияния фоновых шумов

$$\Delta_{б,з} = \int_{\theta_{гл}}^{\pi} |F_{доп}(\theta)|^2 \sin \theta d\theta / \int_{\theta_{гл}}^{\pi} |F_{осн}(\theta)|^2 \sin \theta d\theta. \quad (26)$$

Предельные значения критериев в методе компенсации фонового шума $\Delta_{эл} = 0$, $\Delta_{б,з} = 1$.

Для оценки величины погрешности в двухканальной системе радиотеплолокационного контроля, параметры антенны которой $\Delta_{эл}$, $\Delta_{б,з}$ отличны от предельных, введены коэффициенты влияния $k1_{\Delta}$ и $k2_{\Delta}$

$$k1_{\Delta} = (1 - \Delta_{\text{гл}} / (1 - \beta'_{\text{доп}} / \beta_{\text{осн}}))^{-1}, \quad k2_{\Delta} = \frac{1 - \Delta_{\text{б,з}}}{\beta_{\text{осн}}^{-1} - 1 - \Delta_{\text{гл}}}, \quad (27)$$

значения которых для $b = 0,2$ и $0,3$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

$b_{\text{осн}}$	$\kappa 1_{\Delta}$		$\kappa 2_{\Delta}$		
	$\Delta_{\text{зл}}$		$\Delta_{\text{б,з}}$		
	0,1	0,01	1,01	1,1	1,2
0,2	1,03	1,003	0,002	0,02	0,04
0,3	1,04	1,004	0,004	0,04	0,08

С учетом введенных коэффициентов выражение для определения погрешности радиотеплолокационного контроля имеет вид

$$\Delta_{\Sigma} = k1_{\Delta} d_{\text{Тгл}} + k2_{\Delta} \bar{T}_{\phi} / \bar{T}_{\text{зл}}, \quad (28)$$

где $d_{\text{Тгл}}$ – среднеквадратическая погрешность определения $\bar{T}_{\text{зл}}$ при отсутствии фонового шума.

Коэффициент $k1_{\Delta}$ определяет относительное увеличение погрешности измерения $\bar{T}_{\text{зл}}$ по сравнению со случаем отсутствия фонового шума, а коэффициент $k2_{\Delta}$ – относительный вклад фонового шума в погрешность измерения.

В третьем разделе исследованы характеристики двухканальной системы радиотеплолокационного контроля при реализации дополнительного антенного канала в зеркальной антенне введением второго облучателя, смещенного из фокуса вдоль фокальной оси.

Результаты измерений характеристик зеркальной антенны с дополнительным облучателем, смещенным из фокуса вдоль фокальной оси, показали снижение уровня приема по осевому направлению на 15 - 18 дБ для длиннофокусных антенн и на 20 дБ для короткофокусных антенн при отличии уровня приема в области рассеяния на 10 - 20 % по сравнению с характеристиками зеркальной антенны с облучателем, расположенным в фокусе.

Проведенный численный анализ направленных свойств антенн показал, что при увеличении смещения облучателя уменьшаются потери информационного сигнала и возрастает неадекватность приема по области рассеяния. Минимизация общей погрешности Δ_{Σ} соответствует компромиссному решению, при котором погрешность компенсации фонового шума около 20 % , а потери информационного сигнала не менее 25 %.

В четвертом разделе проанализированы характеристики впервые предложенного варианта построения двухканальной антенны системы радиотеплолокационного контроля на основе двухмодового режима работы облучателя зеркальной антенны или отдельной рупорной антенны – на модах H_{11} и E_{01} круглого волновода.

При исследовании направленных свойств учитывались энергетические соотношения мод круглого волновода H_{11} и E_{01} в угловой характеристике мощности излучения.

На рис. 8 приведены ДН двух каналов двухканальной двухмодовой антенны на примере апертуры диаметром 30 см на частоте 9,27 ГГц. Аналогичная форма ДН получена и при экспериментальных исследованиях антенны.

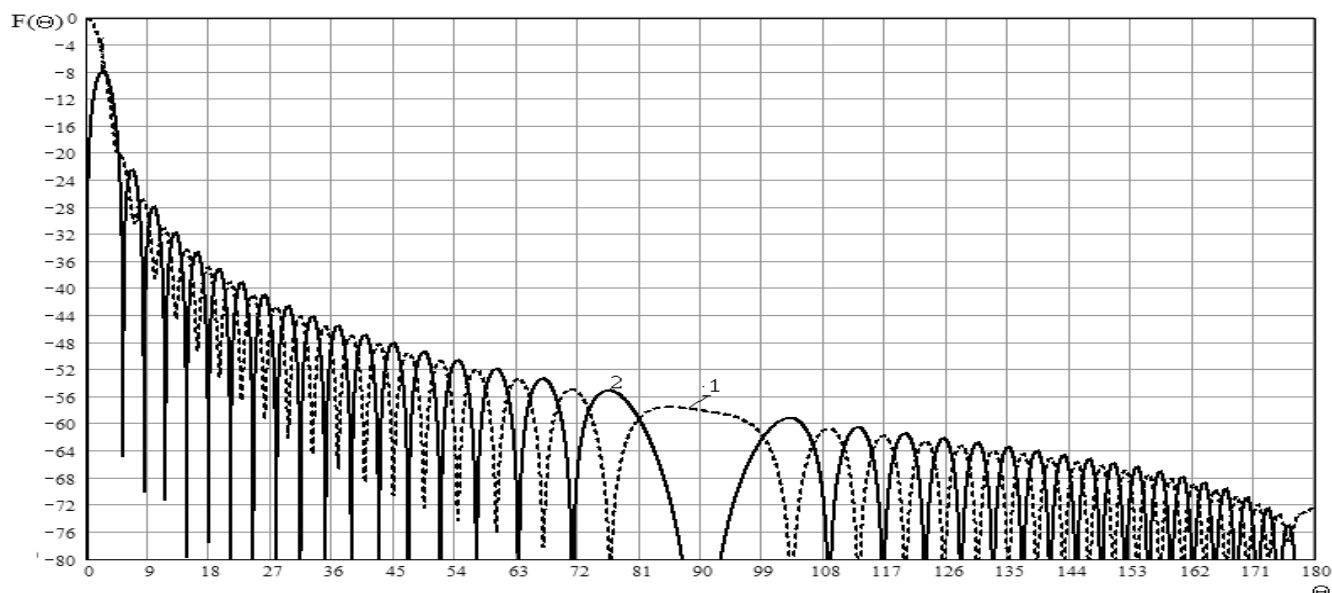


Рис.8 ДН двухканальной двухмодовой антенны: 1 – ДН основного канала; 2 – ДН дополнительного канала

Интегральные параметры двухканальных двухмодовых антенн приведены в таблице 2.

Таблица 2

Диаметр раскрыва, мм	Δ_{Σ}	$\Delta_{\delta,3}$
30	0,094	0,9
92	0,104	0,97
112	0,105	1,01
350	0,106	1,16

Полученные результаты показали возможность обеспечения погрешности компенсации фонового шума на уровне 10 % при потерях мощности полезного сигнала около 10 %.

Для выполнения отдельного приема сигналов на двух модах специально разработан модовый разделитель на основе круглого волновода, величина развязки между каналами у которого не менее -25 дБ, что соответствует приросту общей погрешности радиотеплокационного контроля не более 1 %.

Таким образом, показана возможность аппаратной реализации метода компенсации фоновых шумов в радиотеплокационном контроле на основе двухканального приема.

В **шестой главе** диссертации проанализированы причины нестабильности коэффициента передачи систем радиотеплокационного контроля, как источника мультипликативного помехового воздействия, исследованы способы компенсации его влияния и разработан комплексный метод компенсации аддитивных и мультипликативных помех и предложена его аппаратная реализация на основе двухканального приема с введением тестового шумового пилот-сигнала.

В **первом разделе** проанализирована нестабильность коэффициента передачи системы, вызванная внутренней нестабильностью коэффициента передачи высокочастотной части радиометра. Анализ показал, что она влияет на чувствительность наравне с собственными шумами радиометра при средней относительной величине изменений коэффициента передачи не менее 7 %.

Показано, что одной из внешних причин нестабильности коэффициента передачи системы является изменение коэффициента усиления антенны при образовании на поверхности зеркала слоя осадков. Для оценки степени влияния этого слоя на точность измерений в радиотеплолокационном контроле были введены факторы влияния для каждой ее составляющей входного сигнала

$$T'_a = \bar{T}_{\text{гл}}(1 - \beta_{\text{гл}})\eta f_1 + \bar{T}_{\text{обв}}\beta_{\text{в}}\eta f_2 + \bar{T}_{\text{он}}\beta_{\text{н}}\eta f_3 + T_0([1 - \eta f_4] + f_4) + T_{321}, \quad (29)$$

где f_1, f_2, f_3, f_4 – факторы влияния слоя осадков на поверхности антенны на составляющие антенной температуры $\bar{T}_{\text{гл}}, \bar{T}_{\text{обв}}, \bar{T}_{\text{он}}$

$$f_1 = R_{321}^2 D/D', f_2 = f_3 = D/D', f_4 = 1 - R_{321}^2, D/D' = (1 + (R_{321}^2 - 1)(1 - \beta))^{-1}. \quad (30)$$

где D и D' – КНД антенны при отсутствии и наличии слоя осадков на поверхности зеркала.

Проведенное исследование показало, что при изменении коэффициента отражения \bar{R}_{321}^2 в диапазоне от 1 до 0,9 относительное изменение коэффициента усиления антенны составляет 0,02 и приращение входного сигнала - антенной температуры можно принять равным

$$\Delta T_a = \bar{T}_{\text{гл}}\beta\eta(R_{321}^2 - 1) + \bar{T}_{\Sigma 321}. \quad (31)$$

Численный анализ показал, что при толщине слоя воды 0,3 мм на поверхности антенны относительное изменение коэффициента отражения по сравнению с сухой поверхностью антенны составляет порядка 5 %, что сопоставимо с величиной относительного изменения коэффициента передачи радиометра, поэтому должны быть предусмотрены меры компенсации данного помехового воздействия.

Во втором разделе проанализированы известные способы компенсации влияния нестабильности внутреннего коэффициента передачи радиометра: переход в высокочастотную область при приеме сигнала, в которой спектральные составляющие флуктуаций минимальны; выравнивание антенной и эквивалентной шумовой температуры при модуляционном способе приема в радиометре для выполнения отсчета уровня измеряемого сигнала по шкале эквивалентного источника; введение процедуры деления антенного и эквивалентного сигналов; введение дополнительного тестового пилот-сигнала, подвергаемого помеховому действию флуктуаций коэффициента усиления, с последующей их компенсацией на выходе радиометра.

Проведенный анализ позволил предложить метод компенсации нестабильности коэффициента передачи системы в целом, включая антенну, как комбинацию двух способов: деления сигналов и пилот-сигнала, при реализации возможности излучения и приема отраженного от зеркала шумового сигнала с последующей процедурой деления сигналов.

В третьем разделе проанализирован вариант практической реализации метода компенсации нестабильности коэффициента передачи систем радиотеплолокационного контроля на основе поляризационной развязки входных сигналов. Показано, что данный вариант реализации предложенного метода компенсации имеет недостатки – существенное усложнение облучающей системы зеркала, что приводит к затенению раскрыва, снижению коэффициента усиления, а пространственное размещение облучателей в фокальной плоскости определяет необходимость решения задачи оценки адекватности воздействия слоя осадков на пилот-сигнал.

В четвертом разделе предложен метод компенсации нестабильности коэффициента передачи в системах радиотеплолокационного контроля и его аппаратная реали-

зация на основе двухканальной системы с дополнительным каналом формирования сигнала компенсации фоновых помех с введением режима пилот-сигнала (рис.9).

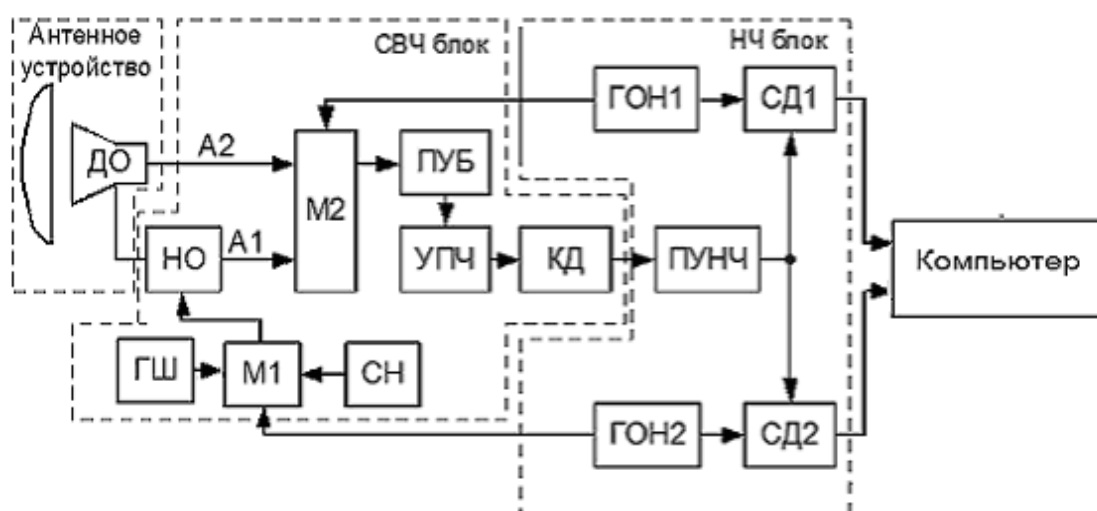


Рис. 9 Функциональная схема двухканальной системы радиотеплолокационного контроля с компенсацией помехового влияния слоя осадков на поверхности антенны

Радиотеплолокационная система содержит параболическую антенну с двухмодовым облучателем (ДО). Основной антенный канал А1 через направленный ответвитель (НО) соединен с модулятором (М2). К дополнительному входу НО через модулятор (М1) подключен источник высокостабильного шумового сигнала (ГШ) – источник тестового пилот-сигнала.

Частоты управляющих напряжений модуляторов М1 и М2 выбираются некретными, поэтому выходные сигналы основного и дополнительного каналов разнесены в частотной области, и после усиления и преобразования общим приемно-усилительным блоком (ПУБ), квадратичного детектирования (КД) и предварительного усиления по низкой частоте в ПУНЧ они разделяется в двух синхронных детекторах СД1 и СД2, на которые подаются опорные напряжения от ГОН1 и ГОН2. Выходные сигналы с СД1 и СД2 поступают на АЦП и далее на компьютер, где выполняется операция нахождения их отношения.

В радиотеплолокационной системе с двухканальной двухмодовой антенной выходное напряжение системы равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{k_{\text{осн}}}{k_{\text{доп}}} \frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{э1}} - T_{\text{э2}}} - \frac{T_{\text{эпр}}}{T_{\text{э1}} - T_{\text{э2}}}. \quad (32)$$

В выходном сигнале $U_{\text{вых}}$ отсутствуют составляющие, обусловленные влиянием слоя осадков и фоновыми шумами.

В диссертации предложен и реализован способ оценки отношения коэффициентов передачи антенных каналов $k_{\text{осн}}/k_{\text{доп}}$ путем измерения выходных сигналов при работе на прием радиошумового сигнала от искусственного высокотемпературного источника и равномерного окружающего фона при наличии и отсутствии пилот-сигнала (рис.10).

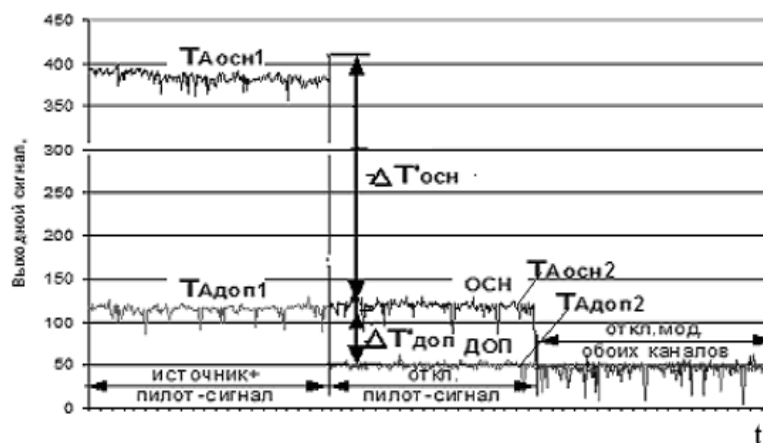


Рис.10 Записи во времени выходных сигналов двухканальной двухмодовой антенны при оценке отношения $k_{осн} / k_{доп}$

Разности антенных температур при наличии и отсутствии пилот-сигнала равны

$$\Delta T_{осн} = R_{321}^2 k_{осн} T_{нс} \text{ и } \Delta T_{доп} = R_{321}^2 k_{доп} T_{нс}, \quad (33)$$

а их отношение определяет отношение коэффициентов передачи основного и дополнительного каналов

$$\Delta T_{осн} / \Delta T_{доп} = k_{осн} / k_{доп}. \quad (34)$$

Таким образом, показана возможность аппаратной реализации предложенного метода компенсации действия внешних мультипликативных и аддитивных помех при радиотеплолокационном контроле в условиях выпадения осадков.

В **седьмой главе** диссертации представлены результаты экспериментальной оценки эффективности предложенных методов компенсации помех в системах радиотеплолокационного контроля метеопараметров в условиях действия внутренних и внешних аддитивных шумовых помех, а также при наличии слоя осадков на поверхности зеркала антенны.

В **первом разделе** приведены технические характеристики и состав специально разработанного макета измерительного комплекса радиотеплолокационного контроля, включающего набор двухканальных антенн (зеркальную и рупорную), двухканальный радиометр модуляционного типа трехсантиметрового диапазона с выходным блоком сопряжения с компьютером и прикладное программное обеспечение.

Во **втором разделе** показаны результаты проверки эффективности компенсации фонового шума поступающего из ближней и дальней боковой области ДН при измерениях по искусственным локальным источникам с детерминированным уровнем шумового сигнала и измерениям радиошумового излучения атмосферы при пространственных неоднородностях фонового шума.

На рис. 11 приведены записи выходных сигналов одноканальной (а) и двухканальной (б) радиотеплолокационной системы при введении локального источника в область главного лепестка (угловое направление $7,5^\circ$) и далее в область ближнего бокового излучения (9° и 11°) антенны. В проведенных исследованиях уменьшение относительной погрешности измерений, обусловленных влиянием искусственного источника высокотемпературного сигнала, расположенного в ближней боковой области, двухканальной системы по сравнению с одноканальной составило 30 %.

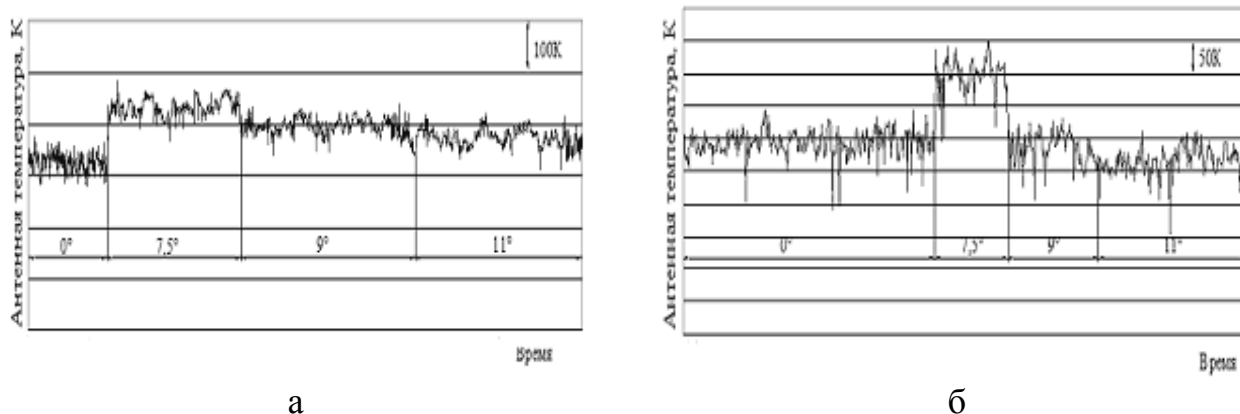


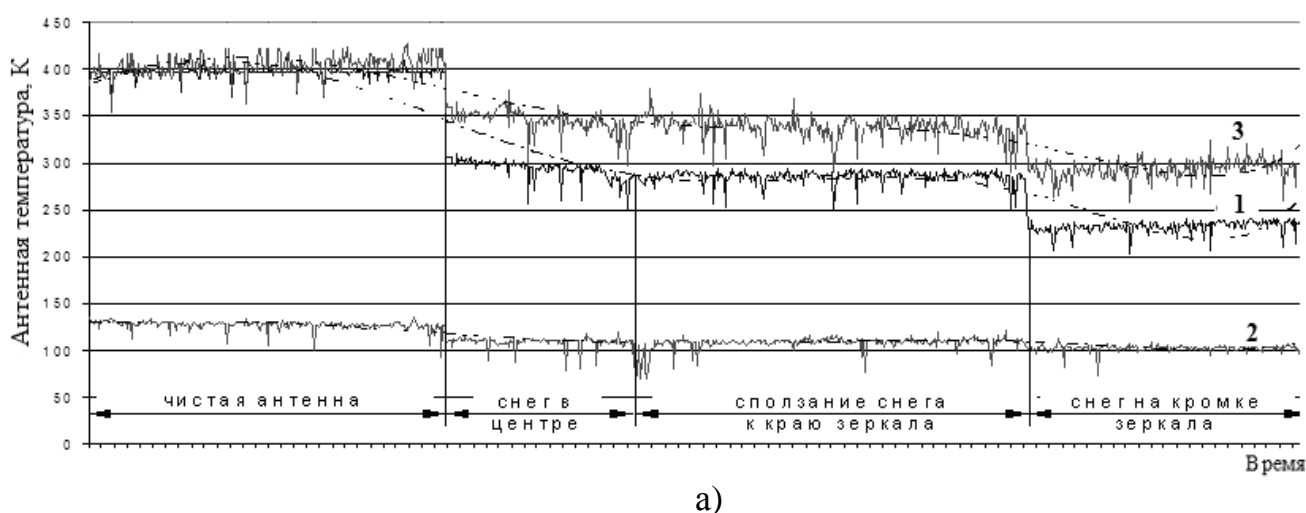
Рис. 11 Выходные сигналы одноканальной (а) и двухканальной (б) радиотеплолокационных систем в величинах антенной температуры

При измерениях радиояркого контраста искусственного источника высокотемпературного сигнала погрешность компенсации фонового шума в двухканальной системе оказалась на 4 % ниже, чем в одноканальной системе. Погрешность измерений, обусловленная изменением характера подстилающей поверхности, в двухканальной системе сократилась на 3,5 %.

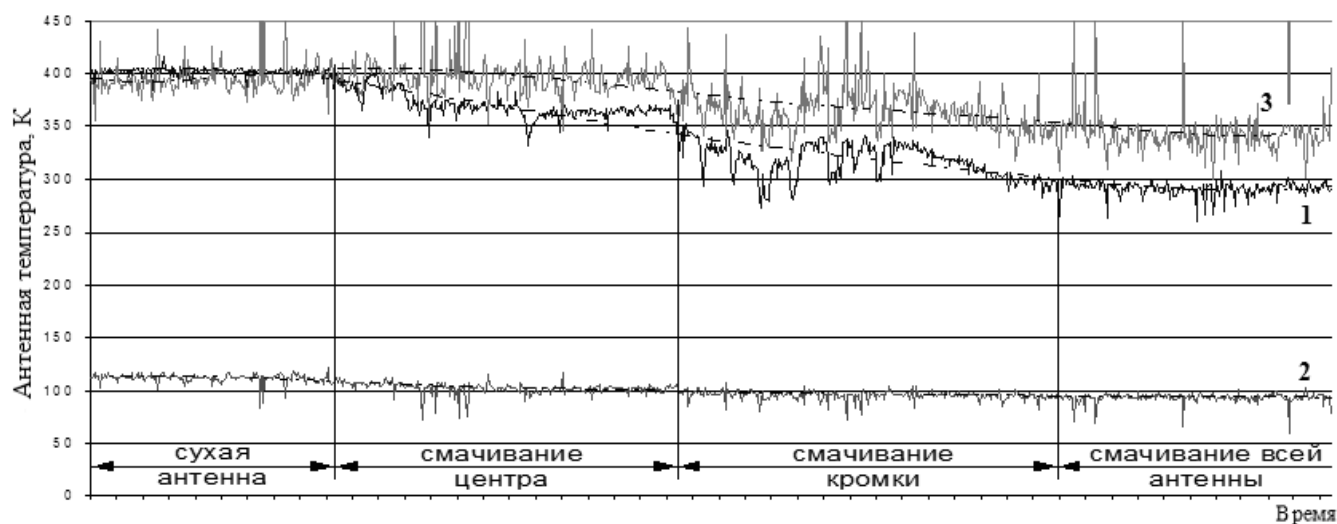
В третьем разделе приведены результаты экспериментальной оценки эффективности компенсации влияния слоя осадков на поверхности зеркала антенны двухканальной системы радиотеплолокационного контроля.

На рис. 12 приведены записи выходных сигналов двухканальной радиотеплолокационной системы с компенсацией влияния слоя осадков – снег (а) и дождь (б), расположенного на разных областях поверхности зеркала антенны.

В проведенных измерениях погрешности в одноканальной системе без компенсации, обусловленные влиянием слоя снега, равны 26,8 – 42,2 %, слоя воды 8,2 – 27,5 %, в двухканальной системе с компенсацией 12,7 – 27,3 % и 1,3 – 13,2 % соответственно.



а)



б)

Рис. 12 Выходные сигналы основного (1), дополнительного (2) каналов и выходного сигнала двухканальной радиотеплолокационной системы после процедуры компенсации (3) при наличии слоя воды (а) и слоя (б) снега на поверхности антенны

Таким образом, полученные результаты подтвердили эффективность предложенных методов компенсации влияния внешних помеховых факторов в системах радиотеплолокационного контроля метеопараметров в условиях нестационарного аддитивного фонового шума и аддитивно-мультипликативного помехового влияния слоя осадков на поверхности антенны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ помеховых факторов в работе систем радиотеплолокационного контроля метеопараметров: однородного фонового шума, локальных неоднородностей фонового излучения, изменения свойств подстилающей поверхности, влияния слоя осадков, образующегося на поверхности антенны, и получены результаты оценки их помехового влияния в виде погрешности измерения радиояркостной температуры.

Разработан метод оценки погрешности радиотеплолокационного контроля дождевых облаков при образовании слоя осадков на поверхности антенны и впервые показано наличие максимальной погрешности в виде положительного прироста входного сигнала при малых интенсивностях дождя.

Предложен способ учета влияния фонового излучения при оценке характеристик радиотеплолокационных систем. Результаты оценки этого влияния показали снижение чувствительности радиотеплолокационной системы на единицы процентов по сравнению аналогичной характеристикой радиометра, наличие погрешности измерений величиной в десятки процентов при отсутствии компенсации фонового шума в зависимости от направленных свойств антенны и уровня радиошумового излучения окружающего пространства.

2. Разработан метод оценки влияния аддитивного фонового шума в основных способах радиотеплолокационного контроля метеопараметров на основе метода оценки погрешности косвенных измерений, выполняемых в радиотеплолокации для определения величин метеопараметров по результатам измерений радиояркостной температуры при введении соответствующих коэффициентов влияния фоновых шумов.

Выполненные исследования показали, что при высокой чувствительности радиометра доля погрешности, обусловленная фоновым шумом в абсолютном способе достигает 50 %, в относительном - погрешность компенсации фонового шума на 5 К вызывает увеличение относительной погрешности измерения в 2 раза, а в способе угловых разрезов она в 1,5 раза выше погрешности относительного способа.

При современном уровне чувствительности приемников радиотеплолокационных систем доля погрешности оценки аддитивного фонового шума может достигать до 90 % в общей погрешности радиотеплолокационного контроля.

3. Выполнен анализ методов компенсации влияния помеховых факторов в системах радиояркого контроля при организации двухканального приема с реализацией угловой и поляризационной селекции сигнала компенсации и выявлены существенные ограничения по их применению в условиях нестационарного фонового шума.

Получено, что метод диаграммной модуляции применим при измерении радиояркого контраста (с погрешностью компенсации фонового шума 5 К), метод поляризационного разрешения – только в системах с зеркальными антеннами (с погрешностью компенсации от единиц до Кельвин при наземном радиотеплолокационном контроле атмосферы, до 10 К при контроле с борта летательного аппарата), метод двухканального приема с дополнительной антенной с малой направленностью – в системах с низкой пространственной селективностью.

4. Разработан метод исключения влияния помехового фактора - аддитивных фоновых шумов при радиотеплолокационном контроле и принципы его аппаратной реализации при переходе к двухканальному приему со специальной формой пространственной селекции дополнительного канала.

Специально разработан метод оценки погрешности компенсации фонового шума для двухканальных систем с учетом реальной характеристик направленности дополнительного антенного канала.

5. Разработаны антенны для радиотеплолокационных систем, реализующих двухканальный метод компенсации влияния фоновых помех.

Впервые разработана двухканальная антенна на основе двухмодового режима работы круглого волновода со специальным модовым разделителем приема по основному и дополнительному каналу. Исследования показали достижимую погрешность компенсации фонового шума в 10 % при потере 10 % мощности полезного сигнала при развязке основного и дополнительного канала модовым разделителем не менее 25 дБ.

6. Разработан метод совместного исключения аддитивно-мультипликативного помехового действия метеосадков и аддитивного помехового действия фонового шума на результаты радиотеплолокационного контроля и разработан вариант его аппаратной реализации в двухканальной системе со специальной формой пространственной селекции дополнительного канала сигнала компенсации и введения тестового шумового пилот-сигнала. Экспериментальные результаты показали уменьшение в два раза погрешности измерения, обусловленной слоем осадков на поверхности зеркальной антенны.

7. Проведена теоретическая оценка и экспериментальные исследования эффективности методов компенсации влияния внешних помеховых факторов в радиотеплолокационном контроле, которые позволяют рекомендовать двухканальную радио-

теплолокационную систему к использованию даже в мобильных системах контроля при сложных неоднородных условиях фонового излучения.

Таким образом, в данной диссертационной работе разработаны теоретические положения и практическая реализация методов оценки влияния внешней среды на характеристики радиотеплолокационных систем и методов компенсации этого помехового влияния в радиотеплолокационном контроле, совокупность которых можно рассматривать как научное достижение в области повышения точности и расширения функциональных возможностей систем дистанционного контроля метеопараметров.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. Федосеева, Е.В. Оценка параметров модового разделителя двухканальной зеркальной антенны радиотеплолокационной системы [Текст] / Е.В. Федосеева, Е.А. Росточкина, И.Н. Росточкин // Радиотехника, 2006. – №6. – С.126 – 128 (личное участие 50%).

2. Федосеева, Е.В. Выбор коэффициента передачи канала формирования сигнала компенсации в радиометрической системе [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехника, 2007. – №6. – С. 49 – 51.

3. Федосеева, Е.В. Сравнительная оценка пространственной разрешающей способности радиометрической системы с дополнительным антенным каналом [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехника, 2008. – №9. – С. 134 – 136.

4. Федосеева, Е.В. Анализ факторов, ограничивающих пространственную разрешающую способность радиометрических систем СВЧ [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехника, 2009. – №11. – С. 130 – 133.

5. Федосеева, Е.В. Характеристики излучения двухканальной двухмодовой антенны радиометрической системы с компенсацией фоновых помех [Текст] / Е.В. Федосеева, И.Н. Росточкин // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ, 2011. – Выпуск 1. – №1. – С.44 – 51 (личное участие 50%).

6. Федосеева, Е.В. Оценка методов компенсации внешних мультипликативных помех в пассивных радиолокационных системах [Текст] / И.Н. Росточкин, Е.В. Федосеева, Е.В. Матвиенко // Вопросы радиоэлектроники. Серия РЛТ, 2011. – Выпуск 1. – №1. – С.19 – 24 (личное участие 30%) .

7. Федосеева, Е.В. Метод относительной калибровки радиометрической системы по локальному источнику шумовой температуры [Текст] / Е.В. Федосеева, И.Н. Росточкин, П.А. Ечин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОТ, 2010. – Выпуск 1. – №1. – С.139 – 144 (личное участие 50%).

8. Федосеева, Е.В., Радиометрическая система с дополнительным каналом формирования сигнала компенсации [Текст] / Е.В. Федосеева, И.Н. Росточкин // Труды ГГО, 2010. – Вып. 562. – С. 243 – 257 (личное участие 50%).

9. Федосеева, Е.В. Исследование влияния осадков на точность СВЧ радиометрических наблюдений [Текст] / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин // Труды ГГО., 2010. – Вып. 562. – С. 226 – 242 (личное участие 50%).

10. Федосеева, Е.В. Моделирование процессов модуляции-коммутиации в двухканальной РМС [Текст] / П.А. Ечин, Е.В.Федосеева // Проектирование и технология электронных средств, 2010. – №1, – С.23 – 27 (личное участие 50%) .

11. Федосеева, Е.В. Программно-аппаратная реализация синхронного детектирования в модуляционных радиометрах СВЧ [Текст] / П.А. Ечин, Е.В. Федосеева, А.А.

Молотков // Проектирование и технология радиоэлектронных средств. – 2011. – №1. – С.30 – 33 (личное участие 50%).

12. Федосеева, Е.В. Погрешности компенсации фоновых шумов в СВЧ радиотеплолокационных измерениях [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиопромышленность, 2012. – Выпуск 2 – С.105 –113.

13. Федосеева, Е.В. Исследования эффективности компенсации фоновых шумов в двухканальной радиометрической системе [Текст] / Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокина // Радиопромышленность, 2012. – Выпуск 2 – С.113 –118 (личное участие 50%).

14. Федосеева, Е.В. Погрешность абсолютных радиотеплолокационных измерений при неоднородном фоновом шуме [Текст] / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин // Научный вестник МГТУ ГА, 2012 – Выпуск 186. – С 43 – 48 (личное участие 50%).

15. Федосеева, Е.В. Оценка влияния неточности компенсации фонового шума на погрешность относительных радиотеплолокационных измерений [Текст] / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин // Научный вестник МГТУ ГА, 2012 – Выпуск 186. – С 58 – 61 (личное участие 50%).

16. Федосеева, Е.В. Результаты оценки относительного уровня принимаемой мощности из области рассеяния ДН антенн в системах пассивной тепловой радиолокации [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2012. – №3. – С.32 – 38.

17. Федосеева, Е.В. Результаты сравнительного анализа погрешности измерения радиояркостной температуры дождевых облаков, обусловленной слоем воды на поверхности зеркальной антенны [Текст] / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2012. – №4. – С.22 – 27 (личное участие 50%).

18. Федосеева, Е.В. Анализ погрешности измерения радиояркостного контраста методом диаграммной модуляции в системах пассивной тепловой радиолокации [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2013. – №1. – С.4 – 9.

19. Федосеева, Е.В. Результаты зондирования облачной атмосферы вблизи радиогоризонта двухканальной СВЧ радиотеплолокационной системой [Текст] / Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокина // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2013. – №3. – С.4 – 10 (личное участие 50%).

20. Федосеева, Е.В. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем [Текст] / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокина // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2014. – №1. – С.50 – 62 (личное участие 50%).

21. Федосеева, Е.В. Результаты электродинамического моделирования модового разделителя двухканальной антенны СВЧ радиометрической системы [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2014. – №2. – С.24 – 29.

22. Федосеева, Е.В. Антенные температуры СВЧ радиотеплолокационных систем контроля параметров природных сред с компенсацией фоновых шумов [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2014. – №3. – С.18 – 22.

23. Федосеева, Е.В. Оценка погрешности измерений радиояркостной температуры в радиотеплолокационных системах контроля метеопараметров с компенсацией фоновых шумов [Текст] / Е.В. Федосеева // Метеорология, 2014. – №11. – С.33 – 42.

Прочие статьи:

1. Федосеева, Е.В. Метод компенсации фонового излучения при радиометрических измерениях в изменяющихся условиях [Текст] / В.В. Фалин, Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин // Региональный научный семинар «Распространение микрорадиоволн в природных средах»// Препринт №458 – Н. Новгород: НИРФИ, 2000. – 48с (личное участие 50%).
2. Федосеева, Е.В. Возможность реализации абсолютных измерений с помощью адаптивной радиометрической системы [Текст] / В.В. Фалин, Е.В. Федосеева, В.А. Моисеев // Радиотехника, телевидение и связь. Межвузовский сборник научных трудов, посвященный 110-летию В.К. Зворыкина, 1999. – С. 10 – 14 (личное участие 50%).
3. Федосеева, Е.В. Построение адаптивных радиометрических систем дистанционного зондирования [Текст] / В.В. Фалин, Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, Р.Л. Ермаков, Е.А. Шашкова //Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2001. – Вып.3 (549) – С.222 – 238 (личное участие 50%).
4. Федосеева, Е.В. Оценка возможности компенсации помеховых компонент сигнала адаптивной РМС [Текст] / Е.В. Федосеева, Е.А. Шашкова, Р.Л. Ермаков, И.Н. Ростокин // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2001. – С.9 – 11 (личное участие 50%) .
5. Федосеева, Е.В. Исследование энергетических соотношений в двухмодовой двухканальной зеркальной антенне [Текст] / Е.В. Федосеева, Е.А. Ростокина, И.Н. Ростокин // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2004. –Выпуск 4. – С. 36 – 41 (личное участие 30%).
6. Федосеева, Е.В. Исследование диапазонных свойств адаптивной радиометрической системы с двухмодовой антенной [Текст] / Е.В. Федосеева, Е.А. Шашкова, И.Н. Ростокин // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2003. – Выпуск 3 – С. 23 – 27 (личное участие 60%).
7. Федосеева, Е.В. Сравнительная оценка чувствительности СВЧ радиометров в условиях действия внешних помех [Текст] / И.Н. Ростокин, Е.В. Федосеева, Е.А. Ростокина // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2007. – Выпуск 9. – С. 116 – 122 (личное участие 30%) .
8. Федосеева, Е.В. Вопросы калибровки радиометрической системы с дополнительным антенным каналом формирования сигнала компенсации [Текст] / И.Н. Ростокин, Е.В. Федосеева, Е.А. Ростокина // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2008. – Выпуск 10. – С.13 – 16 (личное участие 30%).
9. Федосеева, Е.В. Оценка влияния расфазировки облучателя зеркальной антенны радиометрической системы с дополнительным антенным каналом на характеристики ее направленности [Текст] / Е.В. Федосеева // Методы и устройства передачи и обработки информации, 2008. – Выпуск 10. – С.8 – 13.
10. Федосеева, Е.В. Анализ влияния слоя осадков на поверхности антенны на разрешающую способность радиометрической системы [Текст] / Е.В. Федосеева // Методы и устройства передачи информации, 2009. – Выпуск 11.– С. 15–19.
11. Федосеева, Е.В. Статистические вопросы обнаружения радиотеплолокационных сигналов с учетом влияния фонового излучения [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2011. – №1. – С.4 – 7.

12. Федосеева, Е.В. Результаты СВЧ радиометрических измерений в условиях городской застройки [Текст] / Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2011. – №1. – С.8 – 10 (личное участие 50%).

13. Федосеева, Е.В. Принципы оценки погрешности зондирования протяженных объектов радиометрической системой с дополнительным каналом компенсации фоновых помех [Текст] / Е.В. Федосеева // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2011. – №4. – С.4 – 8.

Патенты

1. Патент РФ №2300831 Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна. / Е.В. Федосеева, Е.А. Росточкина, И.Н. Ростокин. Оpubл.: 10.06.2007 Бюл. №16 (личное участие 30%).

2. Патент на полезную модель № 91630 Радиометрическая система с компенсацией аддитивных внешних фоновых помех/ Е.В. Федосеева. Оpubл.: 20.02.2010 Бюл. №5.

3. Патент на полезную модель №98820 Радиометрическая система с компенсацией внешних помех и нестабильности коэффициента передачи системы. / Е.В. Федосеева, И.Н. Ростокин, П.А. Ечин. Оpubл.: 27.10.2010 Бюл. №30 (личное участие 30%).

4. Патент на полезную модель № 122185 Модуляционный радиометр двухканальной радиометрической системы с программно-аппаратным модулем / Е.В. Федосеева, П.А. Ечин, И.Н. Ростокин, А.А. Молотков, А.А. Федосеев. Оpubл.: 20.11.2012 Бюл. № 32 (личное участие 30%).

Монография:

1. Федосеева, Е.В. Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: моногр [Текст] / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин. – Муром: Изд.–полиграфический центр Муромского института ВлГУ, 2012. – 103 с. – ISBN 978-5-8439-0312-1 (личное участие 50%).

Подписано в печать 19.01.2015. Формат 60x84 1/16.

Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс. Печать ризография.

Усл. печ.л. 2. Тираж 100 экз. Заказ № 186.

Отпечатано с готового оригинала-макета
в издательско-полиграфическом центре МИ (филиале) ВлГУ
Адрес: 602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, 23