

На правах рукописи



Щегляков Артем Владимирович

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТР
НА ОСНОВЕ НУЛЕВОГО И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО
МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 2.2.13 –

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель –

Убайчин Антон Викторович,

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры радиоэлектроники и систем связи
ТУСУР.

Официальные оппоненты –

Федосеева Елена Валерьевна,

доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры радиотехники Муромского института
(филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский
Государственный университет имени А.Г. и
Н.Г. Столетовых»;

Шипилов Сергей Эдуардович,

доктор физико-математических наук, профессор
кафедры радиофизики ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет».

Ведущая организация –

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет «Московский институт
электронной техники».

Защита состоится «1» декабря 2026г. в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, ул. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/vx9gjkll>

Автореферат разослан «___» октября 2026 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.415.01
доктор технических наук, доцент



Суровцев Р. С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Микроволновые радиометрические системы находят широкое применение в различных областях народного хозяйства. Так, например, активно разрабатываются системы пассивного радиовидения, предназначенные для поиска потенциально опасных объектов, находящихся за оптически не прозрачными преградами, обнаружения радиотепловых аномалий, пассивной всепогодной и круглосуточной радионавигации и ориентации на местности мобильных роботов, беспилотных летательных аппаратов и т.д. Одной из основных характеристик систем пассивного радиовидения является скорость получения радиотепловых изображений.

В медицинских исследованиях методы микроволновой радиометрии находят актуальное применение для ранней неинвазивной диагностики. Перспективной задачей для развития методов радиотермографии является создание объемных радиотепловых изображений всего организма человека. Решение этой задачи подразумевает многократные, многочастотные измерения по всей площади тела, что очевидно, сопряжено с сотнями и тысячами измерений радиояркостной температуры и приводит к существенному увеличению длительности исследований.

Исследование и мониторинг интегральной и вспышечной активности Солнца обладает повышенным научным и практическим интересом. Влияние солнечной активности на геомагнитное поле Земли приводит к изменению динамики биосферы, нарушениям работы технических средств, в первую очередь связи, наземного и космического базирования и т.д. Особый научный и практический интерес, с точки зрения описания внутренних быстроразвивающихся корональных процессов, представляет собой улучшение временной детализации результатов пассивных дистанционных исследований вспышечной активности в микроволновом диапазоне для прогнозирования влияния солнечной активности на Землю.

Анализ приведенных выше исследовательских направлений показал, что одной из основных технических характеристик радиометрических систем, помимо, флуктуационной чувствительности и точности результатов измерений, является быстродействие.

Прием шумовых сигналов тепловой природы обуславливает необходимость их накопления (усреднения) для обеспечения требуемой флуктуационной чувствительности и точности измерений при заданных параметрах приемника (собственных шумах, ширине рабочей полосы частот и т.д.). Это обуславливает пониженное быстродействие микроволновых радиометров по сравнению с другими средствами пассивного и активного дистанционного зондирования.

Современные микроволновые радиометры, как правило, осуществляют не более 10 измерений в секунду при флуктуационной чувствительности 0,1...1 К. Получение нескольких результатов измерений в секунду недостаточно для исследования динамических объектов и явлений, изменение радиотеплового излучения которых характеризуется постоянными времени от нескольких десятков до сотен микросекунд.

Реализация увеличения быстродействия при сохранении заданных точности и флуктуационной чувствительности является противоречивой задачей.

Решение этой задачи позволит внести существенный вклад в развитие методов и средств пассивных дистанционных исследований быстропротекающих радиотепловых процессов и открыть новые направления исследований, оценки и прогнозирования динамики быстропротекающих процессов, явлений и феноменов.

Степень разработанности темы

Несомненные заслуги по разработке радиометрических систем принадлежат Троицкому В.С., Башаринову А.Е., Аблязову В.С., Вайсблату А.В., Есепкиной Н.А., Королькову Д.В., Парийскому Ю.Н., Федосеевой Е.В., Ростокину И.Н., Краусу Д.Д., Филатову А.В., Кубланову В.С., Camps A. и др. Исследование динамических и быстропротекающих процессов, развитие методик измерений и описание процессов выполнены в работах Ботова Е.В., Иконникова В.Н., Канакова В.А., Безрукова Д.Е., Бельского А.Л., Корнева Н.С. Запатентованные решения структурных схем быстродействующих нулевых микроволновых радиометров принадлежат А.В. Филатову, А.В. Убайчину.

Цель работы – разработать быстродействующий микроволновый радиометр, обеспечивающий повышенное временное разрешение результатов измерений при пассивных дистанционных исследованиях быстропротекающих радиотепловых процессов и обладающий метрологическими характеристиками, соответствующими лучшим мировым аналогам.

Поставленная в работе цель декомпозирована на следующие **задачи**:

1. Разработать алгоритм работы микроволнового радиометра, обеспечивающий повышенное быстродействие при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов;
2. Разработать структурную схему микроволнового радиометра, реализующую предложенный алгоритм повышенного быстродействия.
3. Разработать экспериментальную установку, реализующую структурную схему и алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра.
4. Проведение экспериментальных исследований на основе экспериментальной установки, реализующей предложенный быстродействующий микроволновый радиометр.

Научная новизна

1. Предложено совместное использование нулевого и дифференциального методов измерений для реализации новой структурной схемы быстродействующего микроволнового радиометра с уменьшенным временем установления нулевого баланса при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов.

Соответствует п.1 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, в части исследования процессов работы микроволновых радиометров на основе различных методов измерений и синтеза нового подхода, обеспечивающего повышение эффективности использования этих методов в совокупности.

2. Предложен новый алгоритм работы быстродействующего микроволнового радиометра, отличающийся выбором метода измерений (нулевого или дифференциального), основанного на сравнении результатов измерений, полученных этими методами.

Соответствует п.5 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, в части разработки и исследования алгоритмов, включая цифровые, обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, в том числе синтез и оптимизация алгоритмов обработки.

3. Предложен новый способ расширения динамического диапазона измерений шумовой температуры антенны, отличающийся совместным использованием дифференциального метода измерений и алгоритма запуска широко-импульсной модуляции канала подшумливания в первом или во втором полупериоде амплитудно-импульсной модуляции.

Соответствует п.1 паспорта специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения, в части повышения эффективности радиотехнических устройств за счет увеличения динамического диапазона.

Теоретическая значимость

1. Разработана численная модель работы модуляционного, нулевого и предложенного быстродействующего микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов различных видов.

2. Создан алгоритм работы быстродействующего микроволнового радиометра, основанный на сравнении результатов измерений шумовой температуры антенны, полученной нулевым и дифференциальными методами измерений и обеспечивающий уменьшение погрешности результатов измерений быстропротекающих радиотепловых процессов различных видов.

3. Разработана структурная схема быстродействующего микроволнового радиометра, основанная на совместном использовании нулевого и дифференциальных методов измерений, обеспечивающая уменьшение ошибок измерений быстропротекающих радиотепловых процессов и обладающая метрологическими характеристиками, присущими лучшим мировым аналогам при измерении параметров стационарных радиотепловых процессов.

4. Создана математическая модель, описывающая предложенный быстродействующий микроволновый радиометр при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов различных видов.

Практическая значимость

1. На базе предложенной структурной схемы быстродействующего микроволнового радиометра, основанной на совместном использовании нулевого и дифференциальных методов измерений, создана экспериментальная установка микроволнового радиометра с повышенным быстродействием.

2. Результаты диссертационной работы внедрены в производство высокотехнологичной продукции в части:

2.1 Способы измерения чувствительности бортовых радиолокационных приемников на основе нулевого и дифференциальных методов измерений.

2.2 Алгоритма работы системы измерения чувствительности радиолокационных приемников X-диапазона на основе предложенного способа измерений.

2.3 Структурной схемы системы измерения электрических параметров радиолокационных приемников X-диапазона.

3. Внедрены результаты исследования динамических характеристик микроволновых радиометров, структурная схема и алгоритм работы

быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов в НИР по гранту РНФ.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы исследования, основанные на моделировании в САПР, экспериментальных исследованиях характеристик микроволновых радиометров, методов математической статистики и статистической радиотехники, статистической обработке результатов радиотехнических измерений.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре дифференциального метода измерений при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов, описываемых скачкообразным изменением шумовой температуры антенны, позволяет уменьшить длительность установления нулевого баланса до двух периодов амплитудно-импульсной модуляции или до суммы длительностей двух периодов амплитудно-импульсной модуляции и исследуемого переходного процесса при длительностях переходного процесса до и более половины периода амплитудно-импульсной модуляции соответственно.

2. Предложенный алгоритм работы быстродействующего микроволнового радиометра позволяет уменьшить погрешность измерений быстропротекающих радиотепловых процессов различных видов до уровня, обеспечиваемого дифференциальным методом, и сохранить инвариантность результатов измерений к изменениям коэффициента передачи и собственных шумов радиометрического приемника, свойственным микроволновым радиометрам на основе нулевого метода, при измерении параметров стационарных радиотепловых процессов.

3. Использование дифференциального метода измерений позволяет расширить верхнюю границу динамического диапазона до верхней границы линейности радиометрического приемника, а способ запуска широтно-импульсной модуляции канала подшумливания в первом или во втором полупериоде амплитудно-импульсной модуляции позволяет расширить нижнюю границу динамического диапазона измеряемых шумовых температур антенны до абсолютного нуля при работе быстродействующего микроволнового радиометра согласно нулевому методу измерений.

Достоверность результатов

Достоверность результатов исследования (численная модель сравнения быстродействия различных радиометрических систем, математическая модель предложенной структурной схемы, в совокупности с разработанным алгоритмом) подтверждена качественным и достаточным для практики количественным совпадением результатов моделирования и экспериментальных исследований, полученных на разработанной экспериментальной установке.

Использование результатов исследований

1. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы от ООО «КБ СПАРТ» (система измерений параметров радиолокационных приемников на массовом производстве).

2. НИР «Новый метод пассивных микроволновых исследований быстропротекающих радиотепловых процессов природного и антропогенного характера.», грант РНФ №21-79-00168.

Апробация результатов

Результаты представлены на конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2021г., 2022 г.
2. Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Научная сессия ТУСУР–2021".
3. Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. г. Муром, 2020 г., 2021г., 2022 г.
4. Международная конференция «СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо. г. Севастополь, Крым, 2021г.
5. Всероссийской научно-технической конференции " Метрология в радиоэлектронике." Менделеево, 2021 г.
6. Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. г. Москва, 2021 г., 2022 г., 2023 г.
7. IEEE International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Алтай, 2022 г.
8. 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). г. Екатеринбург, 2022 г.
9. IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), г. Екатеринбург, 2023 г.

Публикации

Опубликовано 34 работы (в том числе 2 работы без соавторов): 2 статьи в журналах из перечня ВАК по специальности 2.2.13; 3 доклада в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus; 21 доклад в трудах отечественных конференций; получено 6 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и 2 патента на изобретение РФ.

Личный вклад

Цель и задачи диссертационной работы определены автором совместно с научным руководителем. Результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну, получены автором лично или совместно с научным руководителем. Обработка и интерпретация результатов экспериментальных исследований выполнена автором лично. Результаты моделирования и макетирования получены соискателем лично при финансовой поддержке ООО «КБ СПАРТ». Отдельные результаты исследования получены совместно с соавторами публикаций.

Структура и объём диссертации: введение, 5 разделов, заключение, список источников из 165 наименований и 2 приложения, всего 152 с., в т.ч. 48 рисунков и 1 таблица.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна, практическая значимость работы, научные положения, выносимые на защиту, перечислены мероприятия по апробации работы, представлены результаты внедрения, приведены сведения о публикациях автора и структуре диссертации.

В первой главе описана проблематика измерений быстропротекающих

радиотепловых процессов, их физика и природа. Приведен литературный обзор современных работ отечественных и зарубежных авторов по теме исследования, структурных схем микроволновых радиометров различных видов. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе описана структурная схема предложенного быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений. Ее особенностью является адаптивный режим работы. Адаптивный режим позволяет использовать преимущества нулевого метода измерений, заключающиеся в инвариантности к изменяющимся шумовой температуре и коэффициенту передачи радиометрического приемника, и дифференциального метода измерений, позволяющего расширить верхнюю границу динамического диапазона и увеличить быстродействие микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов. Приведены результаты аналитического моделирования и расчет флуктуационной чувствительности, показан способ расширения динамического диапазона.

На рисунке 1 приведена **разработанная и запатентованная структурная схема быстродействующего микроволнового радиометра** на основе нулевого и дифференциального методов измерений. Структурная схема включает в себя: источник тока (ИТ), генератор шума (ГШ), переключатель (ПК), направленный ответвитель (НО), первый аттенюатор (АТТ₁), второй аттенюатор (АТТ₂) модулятор (М), антенну (А), приемник (П), импульсный усилитель (ИУ), фильтр высоких частот (ФВЧ), аналоговый мультиплексор (АМ), интеграторы (И₁, И₂ и И₃), дифференциальный усилитель (ДУ), аналого-цифровой преобразователь (АЦП), компаратор (К), блок управления (БУ) и выходную шину данных (ВШ).

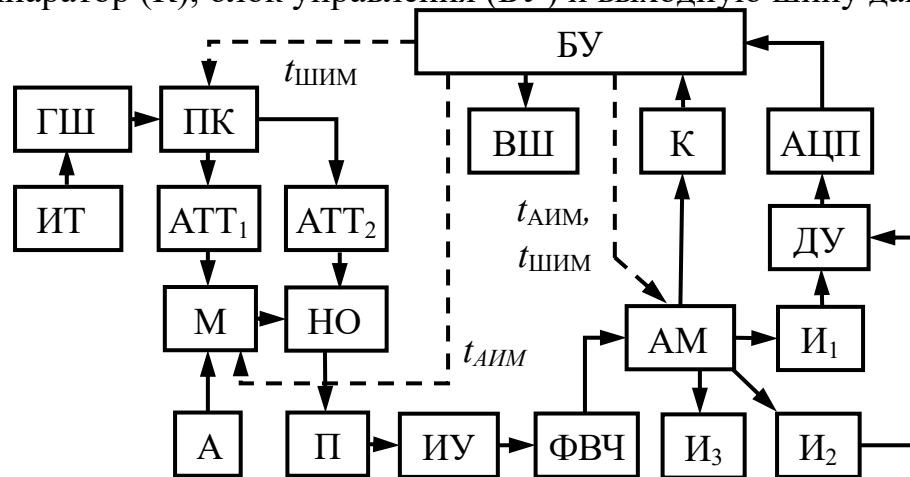


Рисунок 1 – Структурная схема предложенного быстродействующего микроволнового радиометра

Принцип работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра поясняется временными диаграммами, показанными на рисунке 2.

Блок управления формирует сигнал амплитудно-импульсной модуляции $t_{АИМ}$ со скважностью два для управления модулятором (рисунок 2а). Сигнал широтно-импульсной модуляции $t_{ШИМ}$ представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов с переменной длительностью и предназначен для управления переключателем (рисунок 2б). Сигналы $t_{АИМ}$ и $t_{ШИМ}$ так же управляют аналоговым мультиплексором. Если блок управления формирует управляющие сигналы $t_{АИМ}$ высокого и $t_{ШИМ}$ низкого уровней, то на входе компаратора и первого интегратора формируется сигнал (рисунок 2в):

$$A = (\alpha_1 T_{\text{ГШ}} + T_{\text{Ш}}) \Delta f G k, \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент передачи первого аттенюатора; $T_{\text{ГШ}}$ – уровень шумов генератора шума; $T_{\text{Ш}}$ – уровень собственных шумов приемника; Δf – рабочая полоса частот приемника; G – коэффициент передачи приемника; k – постоянная Больцмана.

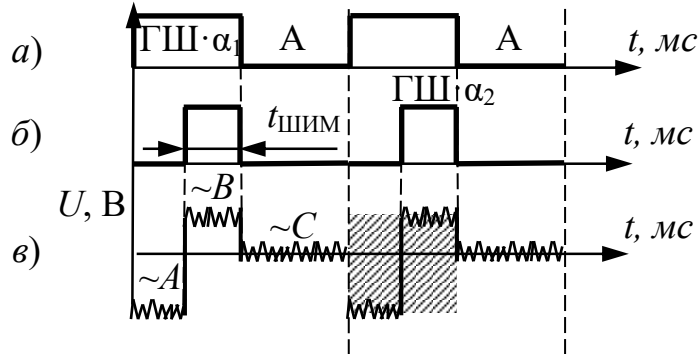


Рисунок 2 – Временные диаграммы, поясняющие принцип работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра: управляющий сигнал амплитудно-импульсной модуляции (а), управляющий сигнал широтно-импульсной модуляции (б), вход компаратора (в)

Если блок управления формирует управляющие сигналы $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ высокого уровня, то на входе компаратора и третьего интегратора образуется сигнал (рисунок 2в):

$$B = (\alpha_2 T_{\text{ГШ}} + T_{\text{Ш}}) \Delta f G k, \quad (2)$$

где α_2 – коэффициент передачи второго аттенюатора.

Если блок управления формирует сигналы $t_{\text{АИМ}}$ и $t_{\text{ШИМ}}$ низкого уровня, то на входе компаратора и второго интегратора формируется сигнал:

$$C = (T_{\text{Ш}} + T_{\text{А}}) \Delta f G k, \quad (3)$$

где $T_{\text{А}}$ – шумовая температура антенны.

В зависимости от состояния сигнала на выходе компаратора, в блоке управления, при высоком уровне $t_{\text{АИМ}}$, происходит регулирование длительности сигнала $t_{\text{ШИМ}}$. Если на выходе компаратора сформирован сигнал высокого уровня, то длительность сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ увеличивается. Если низкого уровня, то длительность $t_{\text{ШИМ}}$ уменьшается. Регулирование осуществляется до тех пор, пока не выполнится равенство вольт-секундных площадей положительного и отрицательного импульсов на входе компаратора (заштрихованные области на рисунке 2в). Среднее значение сигнала во втором полупериоде модуляции равно нулю, что фиксируется компаратором в последующем полупериоде модуляции при его сравнении с потенциалом общей шины микроволнового радиометра. В этом случае выполняется равенство:

$$(B - C)t_{\text{ШИМ}} = (C - A)(t_{\text{АИМ}} - t_{\text{ШИМ}}). \quad (4)$$

Подставляя (1), (2) и (3) в (4), и решая относительно $t_{\text{ШИМ}}$, получим:

$$t_{\text{ШИМ}} = \frac{T_{\text{А}} - \alpha_1 T_{\text{ГШ}}}{\alpha_1 T_{\text{ГШ}} + \alpha_2 T_{\text{ГШ}}} t_{\text{АИМ}}. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует линейная зависимость сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ от входного сигнала антенны. Через длительность сигнала $t_{\text{ШИМ}}$ определяется шумовая температура антенны. Так же, из формулы (5) следует, что на длительность широтно-импульсного сигнала не влияют изменения уровня собственных шумов

$T_{\text{ш}}$ и коэффициента передачи G приемника. Устранение влияния этих дестабилизирующих факторов указывает на работу предложенного быстродействующего микроволнового радиометра согласно нулевому методу.

В процессе измерений на выходе дифференциального усилителя формируется сигнал, пропорциональный разнице значений, накопленных на первом и втором интеграторах:

$$dU = C - A = (T_A - \alpha_1 \cdot T_{\text{ш}}) \cdot \Delta f G k. \quad (6)$$

Таким образом, на вход аналого-цифрового преобразователя поступает сигнал, пропорциональный полному коэффициенту передачи и разнице сигналов генератора шума (с учетом ослабления в первом аттенуаторе) и антенны. В этом случае, результаты измерений не зависят от изменений $T_{\text{ш}}$, а предложенный микроволновый радиометр работает согласно дифференциальному методу измерений.

На рисунке 3 показан эскиз аналитического сравнения режимов работы модифицированного нулевого и предложенного быстродействующего микроволновых радиометров при измерении радиотеплового процесса со скачкообразным изменением шумовой температуры.

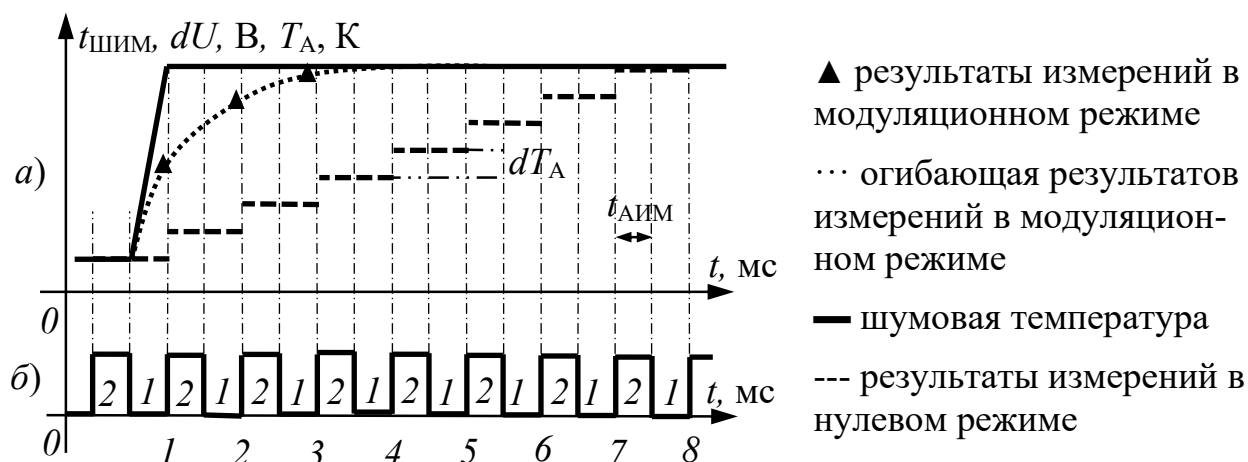


Рисунок 3 – Аналитическое моделирование работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра при измерении быстропротекающего радиотеплового процесса (а); полупериоды модуляции и их количество (б)

Для проведения аналитического моделирования приняты следующие параметры: длительность переходного процесса изменения шумовой температуры антенны 500 мкс, частота модуляции 1 кГц, величина изменения шумовой температуры антенны порядка 7 К, флуктуационная чувствительность $dT_A = 1$ К, постоянная времени первого и второго интеграторов порядка 120 мкс.

При работе предложенного быстродействующего микроволнового радиометра в нулевом режиме по алгоритму последовательного приближения для установления нулевого баланса потребуется порядка 8 периодов амплитудно-импульсной модуляции, что соответствует 8 мс при частоте модуляции 1 кГц. При использовании модуляционного режима результаты измерений будут обладать минимальной ошибкой через 2-3 периода модуляции, что соответствует длительности 2-3 мс.

Полученные результаты измерений дифференциальным методом используются для расчета значения сигнала $t_{\text{шум}}$ через коэффициент L . Коэффициент L

определяется при калибровке предложенного быстродействующего микроволнового радиометра на стационарных источниках шума нулевым и дифференциальным методами измерений.

Алгоритм переключения между режимами работы предложенного микроволнового радиометра основан на анализе разницы полученных результатов измерений дифференциальным и нулевым методами. Если полученная разница превышает значение $T_{\text{порог}}$, то значение $t_{\text{ШИМ}}$ изменяется пропорционально результатам измерений полученным дифференциальным методом. Если полученная разница не превышает значение $T_{\text{порог}}$, то изменение длительности $t_{\text{ШИМ}}$ производится согласно базовому алгоритму.

Если процесс отличается от представленного на рисунке 3, и разница полученных результатов дифференциальным и нулевым методами превышает значение $T_{\text{порог}}$ на протяжении x последовательных периодов, то алгоритм работы прекращает изменения положения $t_{\text{ШИМ}}$ и на выходную шину данных поступают результаты измерений, полученные дифференциальным методом.

Быстропротекающие радиотепловые процессы в ряде случаев характеризуются сравнительно большим изменением шумовой температуры (процессы горения, взрывы и т.д.). В нулевых микроволновых радиометрах для дистанционного зондирования, как правило, динамический диапазон измерений составляет 0...300 К, что накладывает ограничения на измерение процессов связанных, например с горением.

Когда шумовая температура антенны T_A оказывается больше значения $\alpha_1 T_{\text{ГШ}}$, либо оказывается меньше значения $\alpha_2 T_{\text{ГШ}}$, алгоритм обратной связи достигает границ регулирования сигнала $t_{\text{ШИМ}}$, а между полупериодами модуляции не удастся установить нулевой баланс. Осциллограммы для нижнего предела динамического диапазона показаны на рисунке 4а, для верхнего предела показаны на рисунке 4в.

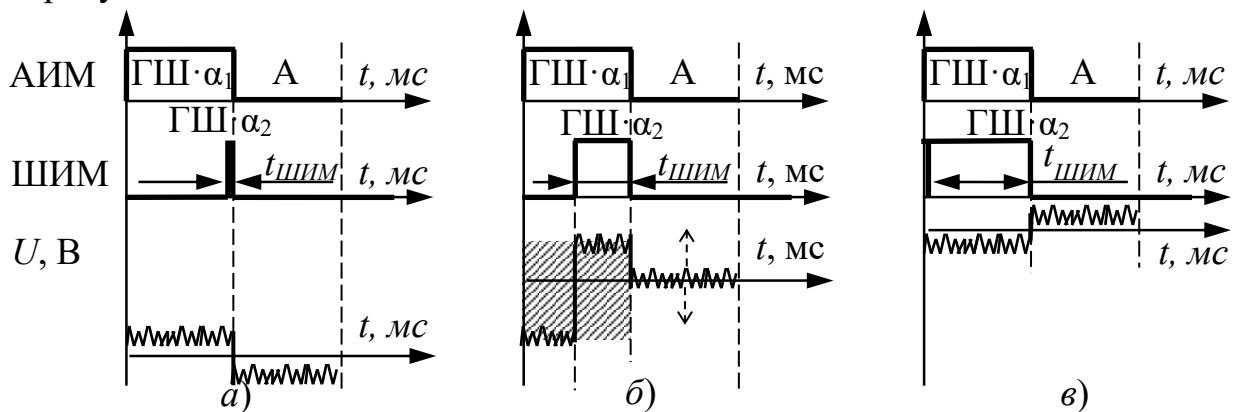


Рисунок 4 – Осциллограммы на выходе БУ и на входе компаратора при выходе за предел нижней границы динамического диапазона (а), при нулевом балансе (б), при выходе за предел верхней границы динамического диапазона (в)

Решение проблемы расширения динамического диапазона в предложенном быстродействующем микроволновом радиометре заключается в реализации способа, изменения положения сигнала подшумливания с полупериода измерения опорного генератора шума на полупериод измерения сигнала антенны (рисунок 5). В этом случае динамический диапазон находится в пределах от 0 К до уровня $\alpha_1 T_{\text{ГШ}}$.

На рисунке 6 показан график передаточной характеристики предложенного быстродействующего микроволнового радиометра.

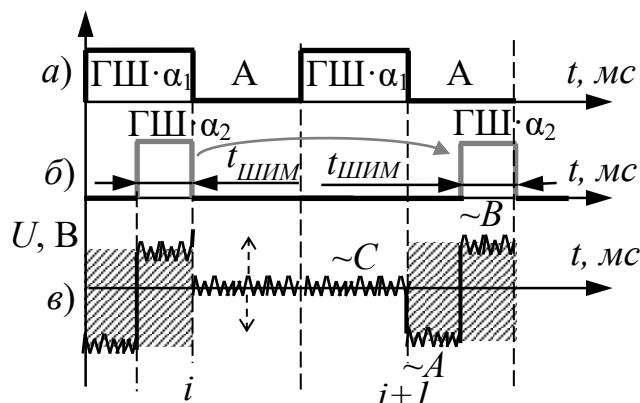


Рисунок 5 – Осциллограммы на выходе БУ и на входе компаратора

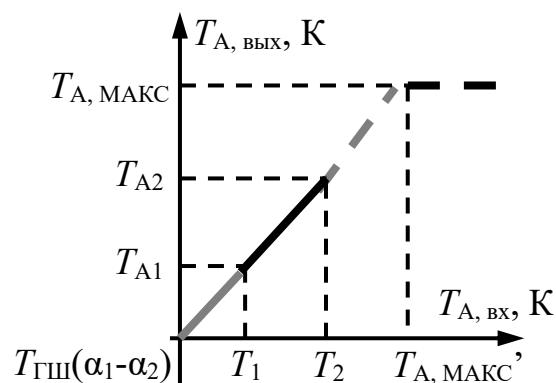


Рисунок 6 – График передаточной характеристики предложенного микроволнового радиометра

Динамический диапазон от $T_{ГШ}(\alpha_1 - \alpha_2)$ до T_1 (где $T_1 = \alpha_1 T_{ГШ}$) обеспечивается нулевым методом с подшумливанием в полупериод измерения сигнала антенны. Динамический диапазон от T_1 до T_2 (где $T_2 = T_{ГШ}(\alpha_1 + \alpha_2)$) обеспечивается нулевым методом с подшумливанием в полупериод измерения опорного генератора шума. Увеличение верхней границы динамического диапазона от T_2 до $T_{A, МАКС}'$ (где $T_{A, МАКС}'$ – верхняя граница линейности радиометрического приемника) обеспечивается дифференциальным методом.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования: компенсационного и модуляционного (рисунок 7), нулевого (рисунок 8а) и предложенного (рисунок 8б) быстродействующего микроволнового радиометров. В проведенном моделировании для всех четырех схем оценена возможность измерения быстропротекающего процесса в виде скачкообразного изменения шумовой температуры антенны по принципу функции Хевисайда с временем переходного процесса 1 мс. Выполнено моделирование предложенного микроволнового радиометра при измерении быстропротекающего процесса, представляющего собой функцию $\sin(x)/x$ (рисунок 9). Промоделирован предложенный микроволнового радиометра с ограниченным и расширенным динамическим диапазоном за пределами верхней и нижней границ динамического диапазона нулевого радиометра. (рисунки 10, 11).



Рисунок 7 – Результаты измерений быстропротекающего радиотеплового процесса компенсационным и модуляционным микроволновыми радиометрами

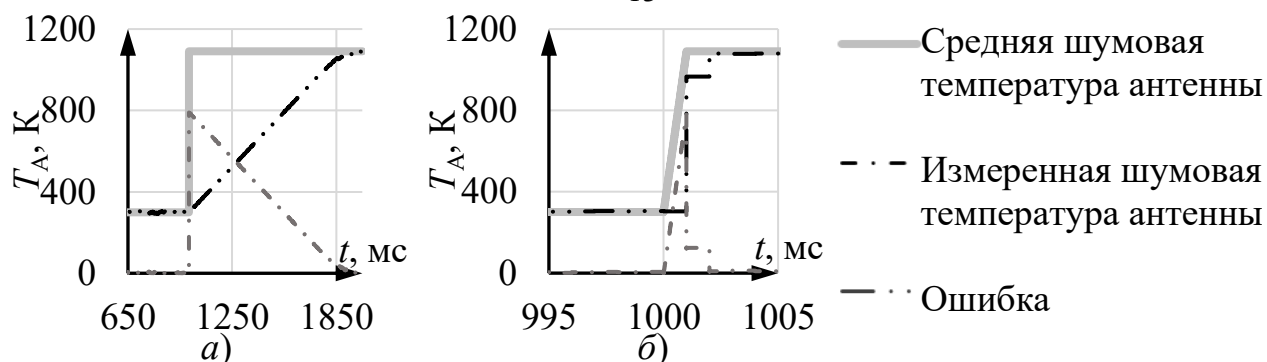


Рисунок 8 – Результаты измерений быстропротекающего радиотеплового процесса нулевым (а) и предложенным (б) микроволновыми радиометрами

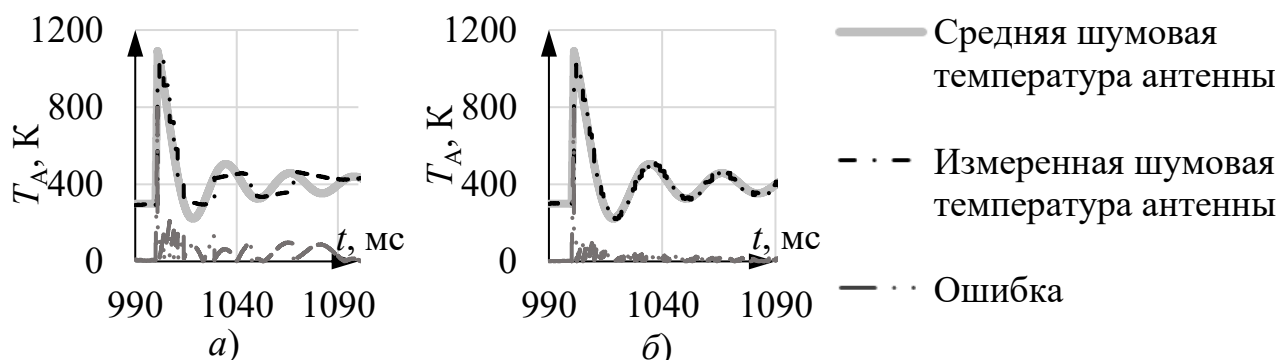


Рисунок 9 – Результаты измерений быстропротекающего радиотеплового процесса на основе функции $\sin(x)/x$ предложенным микроволновым радиометром с алгоритмом ускоренной перестройки (а) и дифференциальным методом (б)

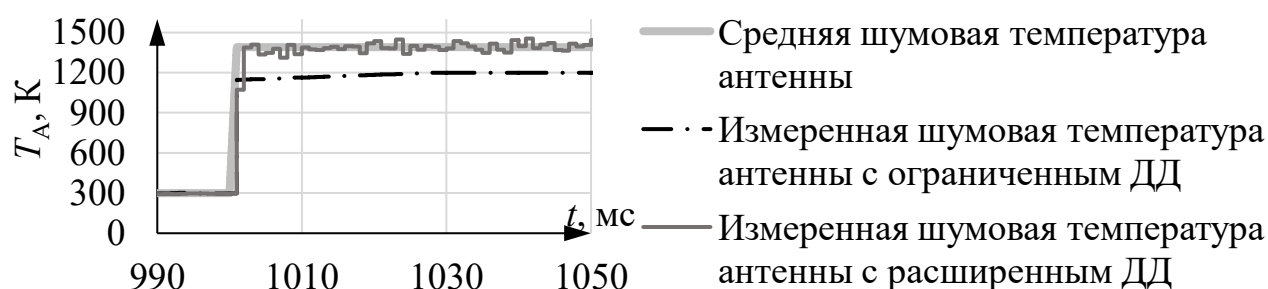


Рисунок 10 – Измерение быстропротекающего процесса предложенным радиометром с ограниченным и с расширенным динамическим диапазоном

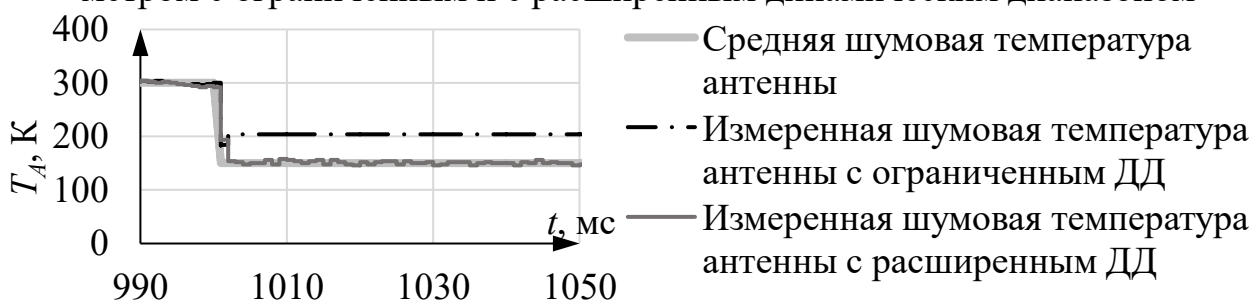


Рисунок 11 – Измерение быстропротекающего процесса предложенным радиометром с ограниченным и с расширенным динамическим диапазоном

В четвертой главе описана разработка экспериментальной установки радиометрической системы и ее составные части. Экспериментальная установка, изображенная на рисунке 12, включает в себя: имитатор быстропротекающих процессов (ИмБП), первый переключатель (ПК₁), обеспечивающий модуляцию по сигналу $t_{\text{АИМ}}$ с блока управления (БУ), первый генератор шума (ГШ₁), питающийся первым источником тока (ИТ₁), направленный ответвитель (НО), второй

переключатель ($ПК_2$), управляемый сигналом $t_{\text{ШИМ}}$, второй генератор шума ($ГШ_2$), питающийся вторым источником тока ($ИТ_2$), приемник ($П$), включающий в себя блоки усиления и фильтрации, аналого-цифровой преобразователь ($АЦП$) и выходную шину данных ($ВШ$).

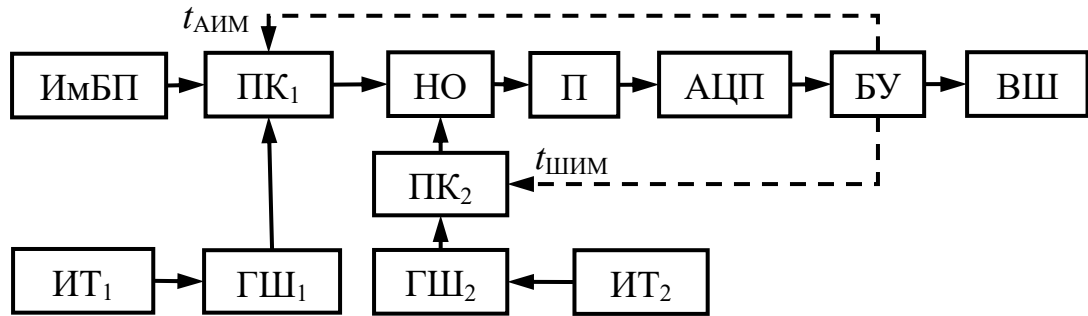


Рисунок 12 – Обобщенная структурная схема экспериментальной установки радиометрической системы

В пятой главе приведены результаты поставленного эксперимента. На рисунке 13 представлены результаты измерений быстропротекающего процесса со временем переходного процесса 400 нс нулевым и предложенным микроволновыми радиометрами. Измеренное время переходного процесса нулевым радиометром 220 мс. Минимальное измеренное время переходного процесса микроволновым радиометром на основе нулевого и дифференциального методов измерений составляет 1 мс.

Использование комбинированного подхода позволило достичь высокой чувствительности и минимального времени установления нулевого баланса при регистрации быстропротекающих радиотепловых процессов. Предложенное решение обеспечивает стабильную работу системы в реальном времени и может быть использовано в задачах оперативной диагностики и мониторинга радиотеплового излучения.

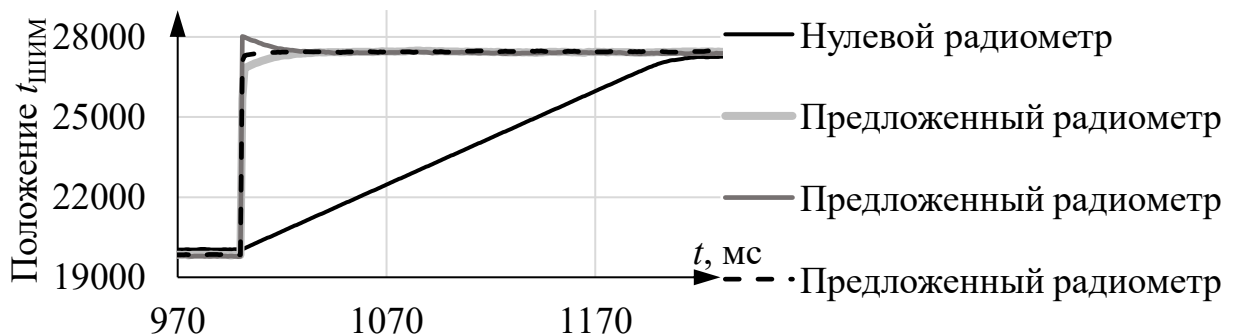


Рисунок 13 – Результат работы экспериментальной установки при измерении быстропротекающего процесса нулевым и предложенным быстродействующим микроволновыми радиометрами

На рисунке 14 показан результат измерения быстропротекающего процесса, представляющего собой функцию $\sin(x)/x$ и продолжительностью 16 мс. Анализируя данные представленные на рисунке 13, можно отметить, что самое детальное отображение быстропротекающего процесса получено при помощи дифференциального метода измерений.

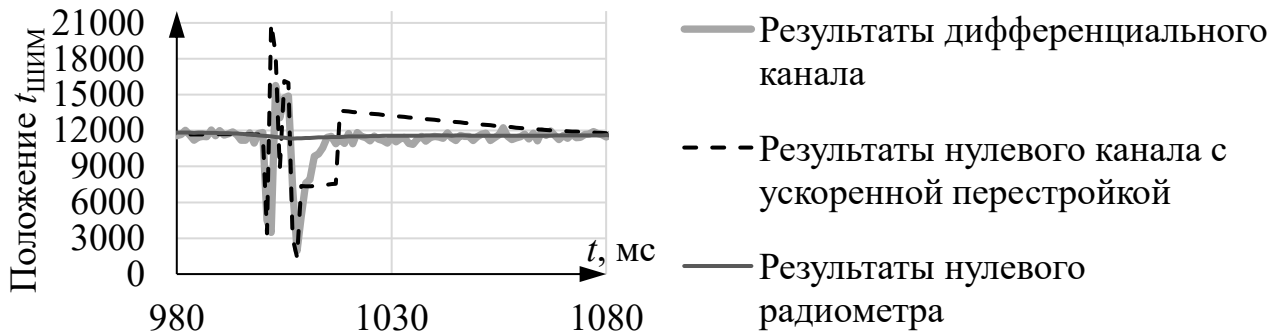


Рисунок 14 – Результат работы экспериментальной установки при измерении быстропротекающего процесса нулевым и предложенным быстродействующим микроволновыми радиометрами

На рисунке 15 представлен результат работы экспериментальной установки при измерении сигнала предложенным быстродействующим микроволновым радиометром на основе дифференциального и нулевого методов измерений за пределами динамического диапазона нулевого радиометра.

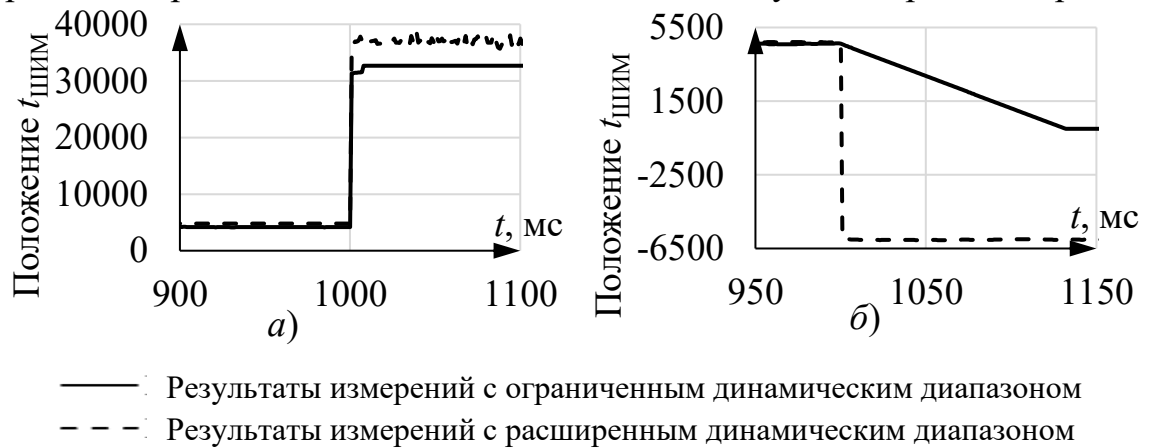


Рисунок 15 – Результат работы экспериментальной установки при измерении сигнала за пределами динамического диапазона нулевого микроволнового радиометра

Закключение и результаты исследования

1. Разработана и запатентована структурная схема быстродействующего микроволнового радиометра на основе нулевого и дифференциального методов измерений.

2. Разработан алгоритм работы для предложенного быстродействующего микроволнового радиометра, позволяющий сократить время установления нулевого баланса до двух периодов амплитудно-импульсной модуляции, уменьшить погрешность измерений быстропротекающих процессов различных видов до уровня, обеспечиваемого дифференциальным методом, и сохранить инвариантность результатов измерений к изменениям коэффициента передачи и собственных шумов радиометрического приемника при измерении стационарных радиотепловых процессов, расширить нижнюю границу динамического диапазона измеряемых шумовых температур антенны до абсолютного нуля, а верхнюю границу динамического диапазона до верхней границы линейности радиометрического приемника.

3. Рассчитана флуктуационная чувствительность для четырех режимов работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра:

нулевой режим работы с сигналом $t_{\text{ШИМ}}$ в полупериоде измерения генератора шума, нулевой режим работы с сигналом $t_{\text{ШИМ}}$ в полупериоде измерения антенны, модуляционный режим работы с сигналом $t_{\text{ШИМ}}$ в полупериоде измерения генератора шума, модуляционный режим работы с сигналом $t_{\text{ШИМ}}$ в полупериоде измерения антенны.

4. Проведено численное моделирование измерения быстропротекающего процесса компенсационным, модуляционным, нулевым и предложенным быстродействующим микроволновыми радиометрами. А также продемонстрированы результаты работы быстродействующего микроволнового радиометра при расширении динамического диапазона по сравнению со схемой нулевого микроволнового радиометра.

5. Разработана экспериментальная установка, реализующая структурную схему и алгоритм работы предложенного быстродействующего микроволнового радиометра. В состав которой входит разработанный имитатор быстропротекающего процесса, позволяющий обеспечить идентичность или строго контролируемое варьирование входного воздействия при испытании различных схем, что критично для оценки и сравнения чувствительности, быстродействия и стабильности работы радиометров.

6. Проведены экспериментальные исследования на разработанной экспериментальной установке, по результатам которых определено время установления нулевого баланса для схем нулевого и предложенного быстродействующего микроволновых радиометров.

Таким образом в настоящей диссертационной работе решена научная задача увеличения быстродействия при сохранении характеристик точности и флуктуационной чувствительности, присущие схемам с нулевым методом измерений, позволяющая внести существенный вклад в развитие методов и средств пассивных дистанционных исследований быстропротекающих радиотепловых процессов и открыть новые направления исследований, оценки и прогнозирования динамики быстропротекающих процессов, явлений и феноменов.

Рекомендации

1. При разработке радиометрических систем рекомендуется предусматривать возможность программной реконфигурации алгоритмов обработки сигналов и управления измерительным циклом. Реализация основных функций радиометра средствами цифровой обработки сигналов на базе ПЛИС или других программируемых устройств позволяет повысить гибкость системы и упростить внедрение новых алгоритмов.

2. Предложенную структурную схему и алгоритм работы рекомендуется использовать при создании микроволновых радиометрических комплексов, предназначенных для измерения параметров стационарных и нестационарных радиотепловых процессов, требующих сочетания высокой точности, расширенного динамического диапазона и повышенного быстродействия.

3. Расширение динамического диапазона дифференциальным методом рекомендуется использовать для грубой оценки температуры за его пределами в моменты коротких всплесков радиотеплового излучения. Для повышения метрологических характеристик в длительной перспективе следует настраивать опорные генераторы шума нулевого метода для обеспечения требуемого динамического диапазона, определяемого уровнем и характером измеряемого сигнала, а также условиями его изменчивости во времени.

Перспективы дальнейшей разработки

1. Перспективным этапом развития работы является переход от экспериментального макета к полнофункциональной измерительной системе с последующей апробацией при решении задач дистанционного зондирования, медицинской радиотермометрии, промышленного контроля и научных исследований быстропротекающих радиотепловых процессов.

2. Использование нескольких параллельных приемных каналов позволит повысить скорость регистрации процессов, расширить функциональные возможности системы и обеспечить пространственное распределение измерений радиотеплового излучения.

3. Исследование возможности расширения функциональных возможностей радиометра за счет применения методов цифровой обработки сигналов и машинного обучения. Данное направление связано с задачами автоматического обнаружения, классификации и параметрической оценки быстропротекающих радиотепловых процессов на основе анализа выходных данных радиометрической системы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Убайчин А. В. Микроволновый радиометр с повышенным быстродействием на основе нулевого и дифференциального методов измерений / А.В. Убайчин, **А. В. Щегляков**, Т. Абдирасул // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2023. Т. 26, № 2. С. 7–13.

2. **Щегляков А. В.** Нулевой СВЧ-радиометр с четырьмя приемниками для исследования быстропротекающих процессов / **А. В. Щегляков**, А. В. Убайчин // Успехи современной радиоэлектроники. 2026. Т. 80, № 5. С. 5–15.

Патенты

3. Патент на изобретение № RU 2763694 С1 Российская Федерация. Радиотермометр / А.В. Убайчин, Т. Абдирасул, Г.Г. Жук, Д.С. Кречетов, **А.В. Щегляков**. – Заявка №2021103876; заявлен 17.02.2021; опубликован 17.02.2021.

4. Патент на изобретение № RU 2794063 С1 Российская Федерация. Микроволновый радиометр / А.В. Убайчин, **А.В. Щегляков**, Т. Абдирасул – Заявка №2022125710; заявлен 01.10.2022; опубликован 11.04.2023.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020615093. Программа управления приемником системы связи на основе шумовых сигналов тепловой природы. Авторы: Жук Г.Г., Убайчин А.В., Абдирасул Т., **Щегляков А.В.** Заявка №2020614172. Дата поступления 11.04.2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.05.2020.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021616119. Программа управления микроволновым радиометром для дистанционного зондирования. Авторы: **Щегляков А.В.**, Убайчин А.В., Абдирасул Т., Жук Г.Г. Заявка №2021612604. Дата поступления 19.02.2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.04.2021

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2021613416. Программа управления счетчиком для широтно-импульсной модуляции канала подшумливания в микроволновом радиометре. Автор:

Щегляков А.В. Заявка №2021612599. Дата поступления 19.02.2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.03.2021.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023614176. Программа управления селекцией импульсов по уровню амплитуды. Авторы: **Щегляков А.В.**, Убайчин А.В., Жук Г.Г., Абдирасул Т. Заявка №2022685736. Дата поступления 22.12.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.02.2023.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023610726. Программа управления коэффициентом стоячей волны согласованной нагрузки. Авторы: **Щегляков А.В.**, Убайчин А.В., Жук Г.Г., Абдирасул Т. Заявка №2022685773. Дата поступления 21.12.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2023.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023610085. Программа управления фазой коэффициента отражения согласованной нагрузки. Авторы: **Щегляков А.В.**, Убайчин А.В., Жук Г.Г., Абдирасул Т. Заявка №2022685774. Дата поступления 22.12.2022 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.01.2023.

Доклады в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

11. Ubaychin A. V. A high-performance microwave radiometer design for sensing high-temperature objects / A. V. Ubaychin, **A. V. Shchegliakov**, T. Abdirasul [et al.] // 2022 IEEE 23rd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM). Altai, Russia, 2022. P. 214–217.

12. Ubaychin A. V. Errors in sensing high-speed thermal radio emission processes in a compensating radiometer / A. V. Ubaychin, **A. V. Scheglyakov**, T. Abdirasul Uulu [et al.] // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. Yekaterinburg, 2022. P. 1330–1333.

13. Abdirasul Uulu T. Near-field microwave radiometer for measurement of the depth temperature of dielectric environments / T. Abdirasul Uulu, A. V. Ubaychin, **A. V. Scheglyakov** [et al.] // 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg, 2023. P. 147–150.

Публикации в трудах конференций, индексируемых РИНЦ

14. Убайчин А. В. Лабораторный макет СВЧ-гиперспектрометра на основе метода нулевых измерений и принципа многоприемниковости / А. В. Убайчин, Г. Г. Жук, Т. Абдирасул, **А. В. Щегляков** [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн («Муром–2020»). Муром, 2020. С. 179–183.

15. **Щегляков А. В.** Исследование характеристик микроволновых радиометрических систем различных типов на основе универсального приемопередатчика USRP 2953-R и программной среды LabVIEW / **А. В. Щегляков**, А. В. Убайчин, Т. Абдирасул [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 451.

16. Жук Г. Г. Чувствительность нулевого радиометра с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока / Г. Г. Жук, А. В. Убайчин, **А. В. Щегляков** [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 31-й Международная конференция «КрыМиКо». Севастополь, 2021. С. 434–437.

17. Убайчин А. В. О задаче дистанционного измерения внутренней температуры биологических объектов / А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, **А. В. Щегляков** [и др.]

др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 31-й Международ. конф. «КрыМиКо». Севастополь, 2021. С. 406.

18. Кречетов Д. С. Оценка влияния интерференции собственных шумов приемника на результаты радиометрических измерений / Д. С. Кречетов, **А. В. Щегляков**, Г. Г. Жук [и др.] // Научная сессия ТУСУР – 2021. Томск: ТУСУР, 2021. С. 62–65.

19. **Щегляков А. В.** О конфигурации радиометрической системы на базе платформы Software Defined Radio от Analog Devices / **А. В. Щегляков** // Научная сессия ТУСУР – 2021. Томск: ТУСУР, 2021. С. 60–62.

20. Абдирасул Т. Численная оценка повышения чувствительности многоприемникового радиометра / Т. Абдирасул, Г. Г. Жук, **А. В. Щегляков** [и др.] // Научная сессия ТУСУР–2021. Томск: ТУСУР, 2021. С. 18–21.

21. Алексеев Е. В. Разрешающая способность по частоте СВЧ-радиометров на основе нулевого метода измерений / Е. В. Алексеев, Г. Г. Жук, **А. В. Щегляков**, Т. Абдирасул, Д. С. Кречетов, А. В. Убайчин // Электронные средства и системы управления. Томск, 2021. С. 91–94.

22. Убайчин А. В. Многоприемниковый СВЧ-гиперспектрометр на основе метода нулевых измерений / А. В. Убайчин, Г. Г. Жук, Т. Абдирасул, **А. В. Щегляков** [и др.] // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Муром, 2021. С. 431–436.

23. Абдирасул Т. Автоматизированная система измерений электрических параметров импульсных магнетронов на массовом производстве / Т. Абдирасул, А. В. Убайчин, **А. В. Щегляков** [и др.] // Метрология в радиоэлектронике. – Менделеево, 2021. С. 303–307.

24. Убайчин А. В. Повышение точности измерений шумовых сигналов тепловой природы в микроволновом диапазоне / А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, Г. Г. Жук, **А. В. Щегляков** [и др.] // Метрология в радиоэлектронике. Менделеево, 2021. С. 261–265.

25. Убайчин А. В. О проблеме измерения параметров быстропротекающих радиотепловых процессов / А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, **А. В. Щегляков** [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 144.

26. Жук Г. Г. Бортовой нулевой радиометр с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока / Г. Г. Жук, А. В. Убайчин, **А. В. Щегляков** [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 19-й Международ. конф. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 133.

27. Алексеев Е. В. Разработка СВЧ-радиометрической системы на основе модификации нулевого метода измерений с повышенными метрологическими характеристиками для исследований температурно-влажностных профилей атмосферы / Е. В. Алексеев, А. В. Убайчин, Г. Г. Жук, **А. В. Щегляков** [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 19-й Международ. конференции. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 125.

28. Абдирасул Т. Численное моделирование нулевого СВЧ-радиометра / Т. Абдирасул, А. В. Убайчин, **А. В. Щегляков** [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 19-й Международ. конф. Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 124.

29. Убайчин А. В. Способы повышения быстродействия микроволновых радиометрических систем на основе нулевого метода измерений с широтно-

импульсной модуляцией опорного канала подшумливания/А. В. Убайчин, **А. В. Щегляков**, Т. Абдирасул [и др.]//Электронные средства и системы управления: материалы международной науч.-практ. конф. Томск, 2022. С.17–19.

30. Убайчин А. В. Ошибки измерений компенсационного микроволнового радиометра при исследовании быстропротекающих радиотепловых процессов / А. В. Убайчин, **А. В. Щегляков**, Т. Абдирасул [и др.]// Всероссийские Армавирские чтения: материалы науч. конф. Муром, 2022. С. 546–551.

31. **Щегляков А. В.** Software defined radio в задачах имитационного моделирования пассивных систем дистанционного зондирования / **А. В. Щегляков**, А. В. Убайчин, Т. Абдирасул [и др.]// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 20-й Междунар. конф. – Москва, 2022. С. 144.

32. Жук Г. Г. Варианты реализации низкотемпературного опорного генератора шума в бортовой радиометрической системе на основе нулевого метода измерений / Г. Г. Жук, А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, **А. В. Щегляков** [и др.]// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 20-й Междунар. конф. Москва, 2022. С. 130.

33. Жук Г. Г. Микроволновый радиометр на основе нулевого метода измерений с упрощенной конструкцией входного СВЧ-блока / Г. Г. Жук, А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, **А. В. Щегляков** [и др.]// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 21-й Междунар. конф. Москва, 2023. С. 122.

34. **Щегляков А. В.** Концепт универсального стенда автоматизированного контроля электрических параметров широкого спектра устройств / **А. В. Щегляков**, А. В. Убайчин, Т. Абдирасул, П. П. Ишудченко // Электронные средства и системы управления: материалы международной науч.-практ. конф. – 2025. № 1–2. С. 157–160.